

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

**Розробка сонячної електростанції для  
побутового використання**

Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу групи ЕТ-21-1

  
Підпис

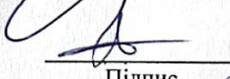
Свідерський Р.Р.  
Прізвище, ініціали

Керівник

  
Підпис


д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Прізвище, ініціали

Нормоконтролер

  
Підпис

Гудзик С.І.  
Прізвище, ініціали

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис

к.т.н., доц. Неймак В.С.  
Прізвище, ініціали

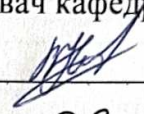
2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень бакалавр  
Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітня програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

  
\_\_\_\_\_

2 . 06 . 2025

ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
**Свідерський Ростислав Романович**

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка сонячної електростанції для побутового використання**

керівник роботи **Поліщук О.С, д.т.н, професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **характеристики побутових сонячних електростанцій**

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 **Огляд та аналіз сучасних рішень для сонячних електростанцій побутового використання**

2 **Розробка конструкції побутової сонячної електростанції**

3 **Розрахунки що підтверджують працездатність сонячної електростанції для побутового використання**

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Схеми роботи сонячних електростанцій. Документ оглядоий

(A1). Аркуш 2. Гібридна сонячна електростанція. Схема структурна (A2) + Інвертор Huawei SUN2000-8K-LC0. Схема електрична

функціональна (A2). Аркуш 3. Гібридна сонячна електростанція.

Схема електрична (A1). Аркуш 4. Розміщення сонячних панелей.

Схема комбінована (A1). Аркуш 5. Крайній затискач для сонячних

панелей. Складальне креслення (A1). Аркуш 6. V-подібний кронштейн

міжпанельного затискача (A2) + Монтажний профіль для сонячних

панелей (А2). Аркуш 7. Оцінка ефективності енергосистеми.  
Результати розрахунків (А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

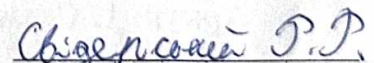
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

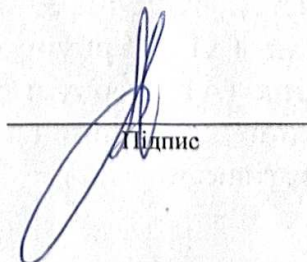
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз сучасних рішень для сонячних електростанцій побутового використання	16.05.25р.	
2 Розробка конструкції побутової сонячної електростанції	29.05.25р.	
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність сонячної електростанції для побутового використання	02.06.25р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	12.06.25р.	

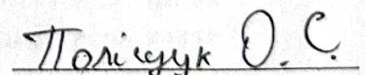
Студент

  
Підпис

  
Прізвище, ініціали

Керівник роботи

  
Підпис

  
Прізвище, ініціали

# АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Свідерський Ростислав Романович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка сонячної електростанції для побутового використання

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 7 арк., сторінок записки 78

5. В Україні процес інтеграції відновлювальних джерел енергії активізувався після впровадження «зеленого» тарифу, що стало поштовхом для інвестицій та зросту інтенсивності розвитку галузі. Окремим поштовхом для розвитку шляхів забезпечення автономного та гібридного живлення стала енергетична криза, спричинена військовою агресією РФ у 2022 році. Як наслідок, зростає необхідність впровадження стабільного енергозабезпечення приватного будинку. Завдяки своїй універсальності екологічності та ефективності для зазначених умов, найперспективнішим варіантом буде встановлення власної сонячної електростанції, що підтверджує актуальність обраної теми. У першому розділі проведено огляд сучасних технічних рішень для побутових сонячних електростанцій, зокрема проаналізовано типи станцій, їх реалізацію, та основні компоненти. У другому розділі було здійснено розробку структури СЕС, обрано головні компоненти, а також створено моделі розміщення та способів кріплення фотоелектричних модулів. У третьому розділі виконано розрахунки, рівня ефективності, економічної доцільності та автономності розробленої СЕС.

Підпис студента \_\_\_\_\_

" 2 " 06 2025 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від "17" 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 5,0 / A

Рекомендації ЕК впровадження у виробництво


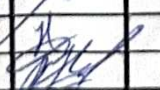
Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар \_\_\_\_\_

" 17 " 06 20 25 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Огляд та аналіз сучасних рішень для сонячних електростанцій побутового використання .....	8
1.1 Актуальність сонячної енергетики для побутових споживачів .....	8
1.2 Мережеві сонячні електростанції та способи реалізації надлишків електроенергії.....	9
1.3 Автономні та портативні сонячні електростанції.....	14
1.4 Гібридні сонячні електростанції.....	17
1.5 Основні компоненти побутових сонячних електростанцій.....	19
1.6 Висновки до першого розділу.....	29
2 Розробка конструкції побутової сонячної електростанції .....	30
2.1 Визначення типу станції та регламенту роботи.....	30
2.2 Розробка структурної схеми .....	30
2.3 Вибір сонячної панелі.....	32
2.4 Вибір інвертора .....	35
2.5 Вибір акумуляторної батареї .....	39
2.6 Вибір лічильника.....	42
2.7 Вибір обмежувача перенапруг.....	44
2.8 Розробка моделі розміщення сонячних панелей .....	47
2.9 Розробка системи кріплення сонячних панелей .....	49
2.10 Висновки до другого розділу .....	52
3 Розрахунки що підтверджують працездатність сонячної електростанції для побутового використання.....	53
3.1 Розрахунок сонячної інсоляції.....	53

БРМА 25.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Свідерський Р.Р.		
Перевір.		Полішук О.С.		
Реценз.				
Н. Контр.		Пундик С.І.		
Затверд.		Неймак В.С.		
Розробка сонячної електростанції для побутового використання			Літ.	Арк.
				5
			ХНУ, гр. ЕМ-21	
			Акрушів	78

3.2 Розрахунок генерації електричної енергії .....	55
3.3 Розрахунок споживання електроенергії приватного будинку.....	58
3.4 Моделювання роботи сонячної електростанції .....	62
3.5 Розрахунок ефективності сонячної електростанції .....	66
3.6 Розрахунок автономної роботи сонячної електростанції .....	69
3.7 Висновки до третього розділу .....	67
Висновки .....	71
Перелік джерел посилання .....	72

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

У сучасному світі щорічно зростає потреба у забезпеченні ресурсами енергетичної складової промисловості та побуту. Потужності зростають, технічний прогрес невинно рухається вперед, що тягне за собою підвищення рівня комфорту життя людей, та потреб на його підтримку. Разом з тим, перед нами з'являються нові виклики. Обмеженість наявних земельних ресурсів, економія, безпека, екологія та збереження довкілля – це все проблеми, які наразі постійно акцентують на себе увагу, змушуючи людство шукати нові, альтернативні джерела енергії. І одним із таких рішень стало накопичення енергії сонця.

У порівнянні, наприклад, з вітровою енергетикою, сонячна має значно вищу доступність, та менший вплив на середовище. Хоча перші сонячні електростанції (СЕС) були введені в експлуатацію більш як 40 років тому, їх актуальність з часом невинно зростає. А завдяки покращенню їх доступності, надійності та ефективності вони дедалі частіше встановлюються як на об'єктах промисловості, так і для побутового використання у приватних будинках.

Тому, метою цієї бакалаврської роботи є розробка сонячної електростанції для побутового використання, та встановлення її у межах приватної території. Головне завдання розробленої станції – забезпечити електроенергією споживачів, зберігаючи при цьому можливість віддачі надлишків генерації до централізованої мережі, а також мати високий рівень гнучкості та універсальності. Розроблена станція повинна бути спроможною повністю заживити об'єкт в умовах тривалих відключень електроенергії.

У межах дослідження необхідно проаналізувати сучасні технології генерації електричної енергії з використанням сонячних ресурсів, обрати оптимальну схему встановлення, компоненти станції, розробити її конструкцію, та обрати відповідне місце встановлення.

За результатами проектування буде проведено моделювання роботи, розрахунок практичної ефективності та економічної доцільності.

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПОБУТОВОГО ВИКОРИСТАННЯ

## 1.1 Актуальність сонячної енергетики для побутових споживачів

У XXI столітті енергія Сонця є одним зі найперспективніших напрямів розвитку відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) на світовому ринку. За даними Global Solar Council, за остані 2 роки загальна світова потужність СЕС зростає більше, ніж за усі попередні 68 років розвитку галузі. Відповідно, у 2024 році встановлена потужність світової сонячної енергетики перевищила 2 ТВт [1].

В Україні особливий розвиток сонячної енергетики відбувається починаючи з 2015 року. На це позитивно вплинуло запровадження «зеленого» тарифу, що мотивував приватних споживачів та інвесторів побічно розвивати ринок, встановлюючи все більше фотоелектричних станцій. Як наслідок, у вересні 2022 року загальна потужність їх перевищила 1,3 ГВт, а в цілому, на території України уже діяло більш як 50 тисяч приватних сонячних електростанцій. Динаміку зросту потужностей та кількості встановлень приведено на рис. 1.1 [2].



Рисунок 1.1 – Динаміка встановлення сонячних електроустановок домогосподарств [3]

Цю тенденцію посилило повномасштабне вторгнення наприкінці лютого 2022 року з боку Російської Федерації. Енергетичний сектор став одним із найголовніших цілей для ракетних обстрілів, що суттєво пошкодило інфраструктуру, і як наслідок, - до масштабних відключень електроенергії у багатьох регіонах, та містах. Часті перебої з електропостачанням підвищили попит на автономні джерела накопичення енергії. У таких умовах встановлення домашньої сонячної станції стає одним із найбільш резонних рішень. Власна СЕС могла б цілком забезпечити базові потреби споживача під час регулярних відключень.

На відміну від рідкопаливних генераторів, які спричиняють викиди газів у атмосферу, створюють високий рівень шуму та потребують постійних витрат на паливо. Автономна сонячна станція хоч і має вищі початкові витрати, усе ж надає перевагу в довгостроковій перспективі. Крім того її суттєвим плюсом є менш вимогливі умови експлуатації та відносна екологічність.

Однак, у більшості приватних будинків на території України є низка конструктивних обмежень, через те, що проектування їх здійснювалось без урахування майбутнього монтажу фотоелектричних модулів на даху, або на прилеглий території. Чимало будівель зводились до того часу, як СЕС розповсюдились достатньо, щоб їх було враховано. Відповідно, для більшості споживачів актуальним буде встановлення середніх та малих станцій.

## 1.2 Мережеві сонячні електростанції та способи реалізації надлишків електроенергії

Враховуючи різноманітність приватних структур, що можуть стати об'єктами для встановлення станцій, існують певні технічні рішення для забезпечення їх ефективної роботи. Тому СЕС поділяються на: мережеві, автономні та гібридні, зважаючи на умови їх застосування.

Мережева СЕС (on-grid) загалом є найбільш розповсюдженим типом фото-

електричних систем. Потреба у станціях такого типу, виникає в умовах постійного використання електричної енергії у великих кількостях, щоб забезпечити ефективну роботу обладнання. І встановлюються вони частіше в цілях економії грошових витрат.

Особливістю цієї станції є її функціональний зв'язок із зовнішньою лінією. Адже встановлений інвертор працює постійно, за наявності напруги з мережі. Не рідко в побуті прослідковується неспівпадіння активної реалізації енергії з часом її найбільш ефективної генерації. Таким чином, у власника виникає необхідність продавати надлишки, вироблені у години піку [4].

Схема роботи мережевої СЕС зображена на рис.1.2.



Рисунок 1.2 – Схема роботи мережевої сонячної електростанції [5]

Найпопулярніший спосіб – це продаж по «зеленому» тарифу. Відбувається це таким чином: надлишок виробленої сонячними панелями енергії передається у зовнішню мережу через двонаправлений лічильник. Надходження цієї енергії фіксуються оператором системи передачі (Обленерго). Кошти за продану електроенергію споживач отримує від держави, через ДП «Гарантований покупець» – це спеціально створена структура, яка займається закупівлею енергії у

виробників ВДЕ. Схематично механізм продажу зображено на рис.1.3 [6].



Рисунок 1.3 – Механізм продажу електроенергії з а «зеленим» тарифом [6]

Проте «зелений» тариф має кілька обмежень. Згідно Закону України «Про альтернативні джерела енергії», споживач не може продавати надлишок по «зеленому» тарифу, якщо загальна потужність станції більше 30 кВт.

Для побутових споживачів процедура підключення за «зеленим» тарифом суттєво спрощена, так як потужність станцій не перевищує встановлені ліміти, а частіше знаходиться в межах від 5 до 10 кВт. Все що власник повинен зробити – це пройти процедуру повідомлення та технічного підключення.

Головною метою цієї системи була мотивація до активного розвитку галузі на території України. Але на сьогоднішній день, у системи «зеленого» тарифування чітко виражена тенденція щорічного зниження коефіцієнта оплати. Що призводить до зменшення грошових надходжень за 1 кВт·год. Для запобігання перенасиченості енергоринку, захисту інтересів Держави та енергетичних компаній, цей процес є виправданим. Проте з розвитком технологій, та оптимізацією виробничих процесів,

відбувається здешевлення монтажних систем, панелей та інверторів. А разом зі зменшення об'єму інвестиційних вкладень, ця тенденція спонукає до пошуку альтернатив.

Підтвердження тезису можна знайти в тексті Закону України «Про альтернативні джерела енергії», де чітко вказано про встановлення «зеленого» тарифу до 1 січня 2030 року. Після вказаного терміну ця система нажаль перестане функціонувати [7].

Тому вже зараз з'являються нові системи тарифування, що у майбутньому могли б замінити «зелений» тариф. Найперспективніша серед них – Net Billing. Відрізняються ці системи тим, що при оплаті за першою, ключову роль відіграє курс євро, адже ставка за 1 кВт·год прив'язана до цієї валюти, і фактично визначається державою. В свою чергу Net Billing дає можливість продавати енергію за ринковою ціною. І покупцями можуть бути або оператор системи передачі (ОСП), або інший ліцензований електропостачальник. Однак грошові зарахування не надходять споживачу безпосередньо. Вони вводяться на спеціальний заліковий рахунок, де наприкінці розрахункового періоду визначається решта, яку споживач отримає або заплатить, в залежності від співвідношення використаної та наданої ним електроенергії [8; 9].

Системи Net Billing доступна для таких груп споживачів:

- звичайні споживачі, що мають можливість підключення фасадних станцій потужністю до 50 кВт, та наземних/дахових – до 30 кВт;
- малі непобутові споживачі можуть встановити СЕС потужністю до 50 кВт;
- інші споживачі (юридичні особи, ФОПи та ін.), що не мають чітко визначених обмежень що до встановлених потужностей, адже в цьому випадку все вирішують умови договору.

Фактично споживачі, що володіють станціями від 150 кВт, і до 5 МВт можуть виступати в ролі активного споживача, проте для них встановлено обмеження щодо випуску електричної енергії [10].

Схема продажу електроенергії за системою Net Billing приведена на рис. 1.4.

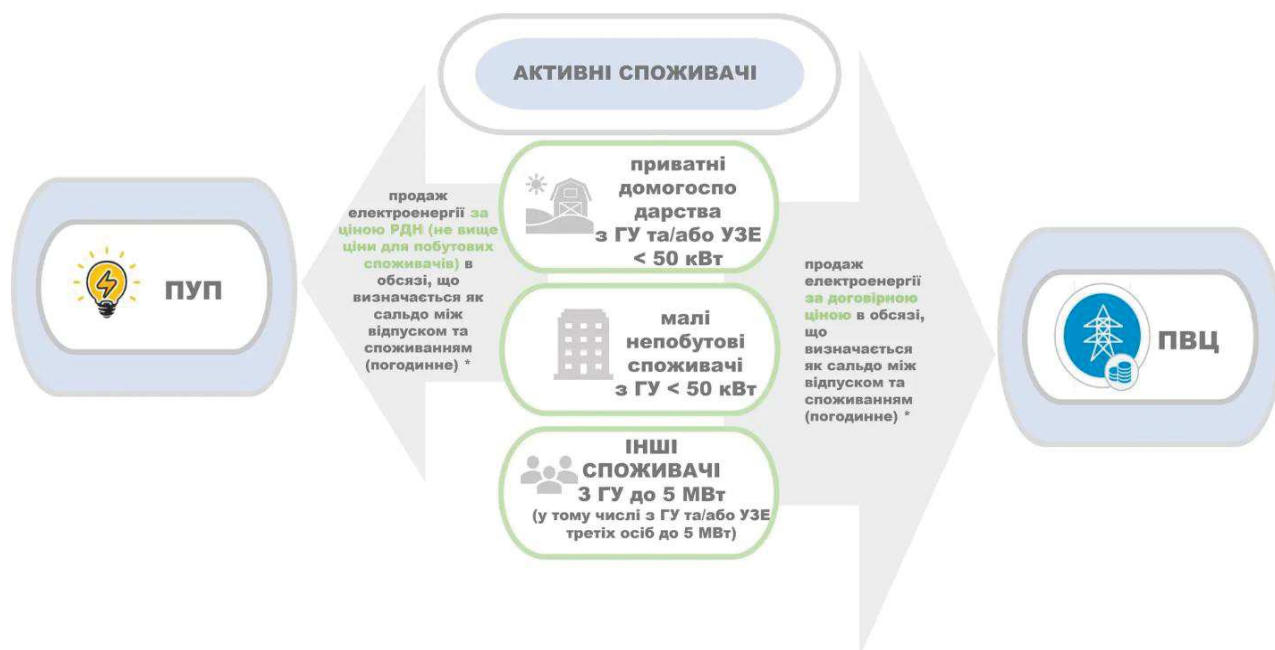


Рисунок 1.4 – Механізм продажу електроенергії за системою Net Billing [6]

Існує також ще одна альтернатива «зеленому» тарифу і Net Billing, – це система Net Metering.

За цим механізмом, споживач віддає надлишки електроенергії, виробленої власною СЕС, до мережі. Але розрахунок проводиться не в грошових одиницях, а у кВт·год. Інакше кажучи, споживач має можливість у майбутньому отримати безкоштовно таку ж кількість електроенергії з мережі, яку він надав попередньо.

Один із головних недоліків мережевої станції – відсутність акумуляторів, через що Net Metering для них може бути особливо актуальним. Так як ця система потенційно може взяти на себе роль накопичування нереалізованої електроенергії [9].

Крім того, неможливість роботи станції в разі відсутності навантаження із зовнішньої мережі є ще одним вагомим обмеженням мережевої СЕС. Це відбувається через постійну синхронізацію встановленого інвертора з мережею.

Тому якщо напруги зі сторони мережі немає, інвертор вимикається. Такий механізм потрібен як для економії під час монтажу станцій, так і для захисту електромонтерів під час ремонтних робіт після аварійного відключення ЛЕП. І якби станція так і продовжувала наводити струм у мережу, це могло б призвести до негативних наслідків.

Однак, незважаючи на недоліки, мережеві мають свої переваги у порівнянні з іншими видами побутових СЕС:

- відносна дешевизна, що досягається відсутністю витрат на акумуляторне забезпечення, інвертор(и) та інше обладнання, що до того ж має обмежений термін експлуатації;
- простота конструкції та монтажу, що також зменшує витрати, та імовірність поломки обладнання.
- висока ефективність мережевої СЕС в умовах стабільного електропостачання [4].

### 1.3 Автономні та портативні сонячні електростанції

Автономна СЕС (off-grid) – це окремий клас фотоелектричних систем, що працюють незалежно від зовнішньої мережі. Суть яких полягає у можливості забезпечення енергією об'єктів, у разі відсутності стабільного електропостачання. Тому в побутовому секторі автономні СЕС особливо актуальні для господарств, які характеризуються як віддалені, і не мають можливості бути заживленими з мережі.

Функціонально автономна СЕС заснована на принципі акумулювання надлишкової енергії, що була вироблена в сонячний час доби. Накопичена енергія може далі бути використана у дні, коли генерація сонячних панелей обмежена погодними умовами, або у нічний час. Це означає, що однією із головних переваг станції є її енергетична незалежність. Схема роботи зображена на рис. 1.5.

З економічної точки зору встановлення сонячної станції без підключення до

мережі не завжди є виправданим, адже вартість такої станції значно перевищить витрати на мережевий варіант. Проте користувач автономної станції абсолютно не залежить від тарифів, політичних та економічних змін. І особливо, від аварій у системі електропостачання [11].

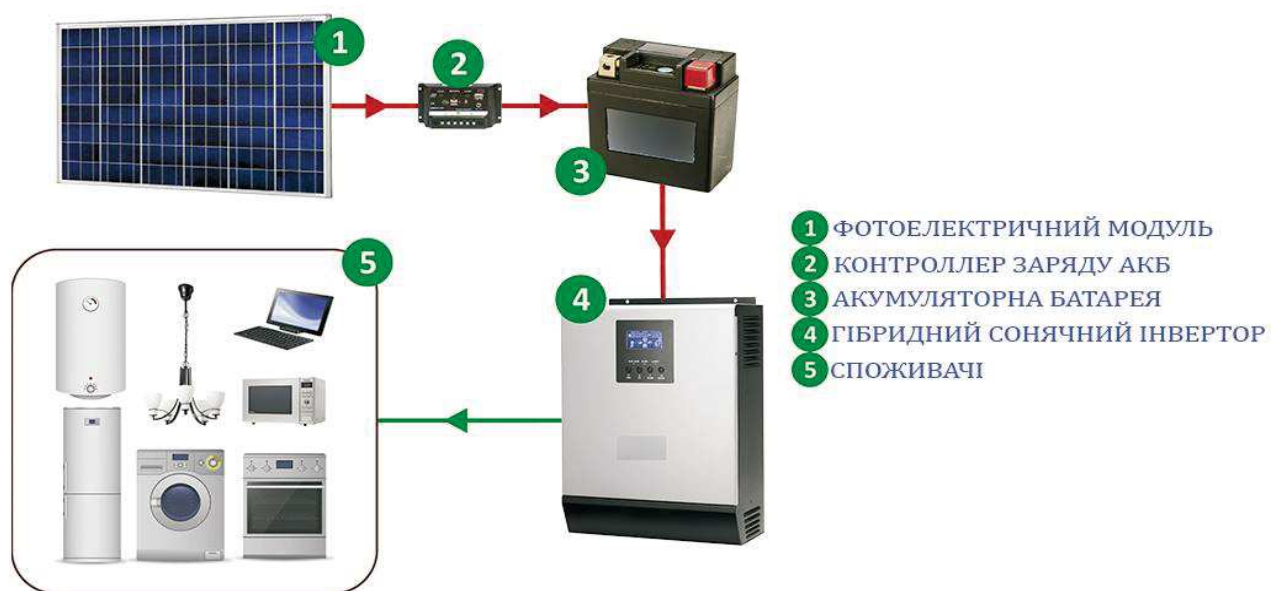


Рисунок 1.5 – Схема роботи автономної сонячної електростанції [5]

Варто зазначити, що окрім підвищення грошових витрат на інвертор(и), контролер заряду та акумулятори, та реалізацію в цілому, зростають і вимоги до проектування станції. Адже таку систему необхідно розраховувати дуже точно.

Все тому, що автономні системи частіше використовуються за двома сценаріями:

- у якості резервної станції, коли струм у мережі зникає, і потрібно забезпечити живлення всього об'єкту (або деяких його елементів) енергією для ефективної роботи;
- у цілях економії, для постійного забезпечення конкретних приладів, що мають підвищене споживання електроенергії [12].

І один, і другий варіант потребує врахування сукупної більшості факторів, ніж для проектування мережевої СЕС. Необхідно точно знати, яку кількість

електроенергії споживач використовує протягом року, а також у які години вона використовується активніше. Ще одним викликом є пошук місця встановлення та куту нахилу модулів, що може ускладнюватись невдалим плануванням території, конструкцією даху будинку, та його орієнтацією за сторонами горизонту. Неправильний розрахунок може призвести до зайвих витрат, через надлишкове резервування енергії, або до обмеження її генерації фотоелектричними модулями.

На ринку також можна знайти переносні автономні станції. Такі рішення зазвичай об'єднують у одному корпусі більшість ключових елементів (акумулятор, контролер, інвертор та вихід для підключення фотоелектричних модулів), що значно підвищує рівень комфорту та ергономічність. Структурна схема портативної СЕС приведено на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Схема роботи портативної сонячної електростанції [13]

Яскравим прикладом є портативна електростанція від BLUETTI (див. рис. 1.7). Висока мобільність дозволяє встановлювати їх будь-де, за наявності сонячного світла. До того ж, ці моделі можуть заряджатися і від автомобільного прикурювача, і від мережі. Не потребують довгого монтажу та легко переносяться.

Переносні сонячні станції зручно використовувати у туристичних подорожах, польових умовах (у тому числі для військових потреб), а також для живлення ламп, ліхтарів, ноутбуків та роутерів, у разі відключення світла.

Головними недоліками потративних станцій є їхня вартість за 1 кВт·год збереженої енергії. Ціна BLUETTI AC200P становить 1500 долларів, а забезпечена потужність усього 2 кВт·год. На додачу: обмежений термін придатності акумулятора та велика вага (до 30 кг), що помітно звужує коло покупців [14].



Рисунок 1.7 – Портативна станція BLUETTI AC200P [14]

Проте у місцях, де проводяться бойові дії, присутні серйозні проблеми із електропостачанням. Через що попит на мобільні сонячні станції постійно зростає, особливо зі сторони військових та медиків.

#### 1.4 Гібридні сонячні електростанції

Гібридна СЕС (hybrid) є компромісним рішенням, що поєднує в собі особливості мережевих та автономних систем. Така система дозволяє забезпечити стабільне електропостачання об'єкта, завдяки підключенню до мережі та наявності акумуляторів.

Висока гнучкість системи забезпечується у тому числі і встановленим гібридним інвертром, що оснащений функцією перемикання навантаження за потреби. Це дещо розширює можливості станції, і дозволяє віддавати надлишкову енергію у мережу, у разі заповнення ємностей акумулятора [15].

У побутовому секторі комбіновані рішення стають дедалі популярнішими

завдяки їх надійності та економічному прагматизму. Так як через свій зв'язок із мережею – потребують акумулятори з меншою ємністю, ніж автономні СЕС. Але при цьому дозволяючи уникати головного недоліку мережевої станції – залежності від зовнішнього живлення. Що робить їх бажаними для встановлення в умовах частих відключень. Схему роботи гібридної СЕС приведено на рис. 1.8.



Рисунок 1.8 – Схема роботи гібридної сонячної електростанції [5]

Варто зазначити, що гібридні СЕС не рідко стають частинами гібридного енергопостачання у ширшому розумінні. Їх гнучкість дозволяє використовувати їх разом з вітровими електростанціями (ВЕС), що в умовах непостійності сонячної інсоляції зменшує залежність від одного типу генерації, і дозволяє зменшити обсяг акумуляторів. Проте для побутового сектору частіше застосовують комбінації з рідкопаливними генераторами [16].

Для використання в цілях економії, гібридні станції мають свої умови. Щоб знизити пікові навантаження на мережу та оптимізувати процес взаємодії із зовнішнім джерелом живлення, необхідно знати шаблон загального енергоспоживання. Це дасть можливість точніше розрахувати систему, і знизити пікове навантаження [17].

Проте, незважаючи на збільшення витрат, у порівнянні з мережевими СЕС гібридні окупаються помітно швидше, особливо в умовах перебоїв з електроенергією.

### 1.5 Основні компоненти побутових сонячних електростанцій

Сонячна електростанція, незалежно від її типу складається із ряду елементів, взаємозв'язана робота яких забезпечує її надійну та довговічну роботу.

Фотоелектричні модулі є головним джерелом енергії в СЕС. Їхнє призначення – перетворення сонячної енергії у постійний струм за допомогою явища фотоелектричного ефекту, що лежить в основі роботи фотоелементів. Це процес, під час якого електрони в речовині починають вивільнюватись під впливом фотонів світла.

Фотоелемент (сонячна комірка) є основою сонячної панелі, що виготовляється із напівпровідникового матеріалу (найчастіше кремнію). Ці сонячні комірки структуруються шарами: верхній n-шар, що має надлишок електронів; нижній р-шар, де кількість електронів у дефіциті. Коли сонячний промінь потрапляє на верхній шар комірки, фотони вибивають електрони з напівпровідника, і вони потрапляють до нижнього шару. Таким чином утворюється різниця потенціалів, формується внутрішнє електричне поле, що призводить до появи струму. Одиарно така комірка може видати близько 0,5 В напруги, тому їх з'єднують у модулі [18].

Принцип роботи фотоелектричного модуля проілюстровано на рис. 1.9.

Кремнієві сонячні панелі зустрічаються найчастіше, через те що цей матеріал є досить дешевим, і поширеним у земній корі. Залежно від технології виготовлення та експлуатаційних властивостей існують полі-, монокристалічні та аморфні варіанти.

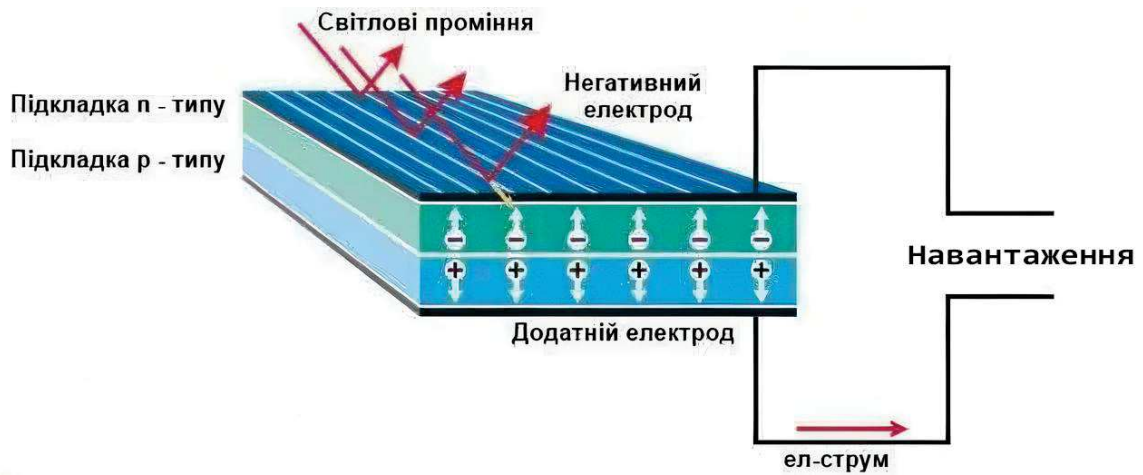


Рисунок 1.9 – Принцип роботи сонячної панелі [19]

Монокристалічні елементи виготовляються з використанням високоочищеного кремнію. У процесі обробки його відрізають цільними пластинами, що сприяє більшому збереженню фотоелектричних властивостей. Частіше монокристалічні модулі мають зрізані кути, це допомагає підвищити ККД, шляхом ефективнішого проходження електронів по площині панелі. Візуально їх також можна відрізнити за чорним, або темно-синім кольором фотоелементів (див. рис. 1.10).

Монокристалічні елементи є дорожчими, але водночас ефективнішими серед інших моделей. Вони краще працюють при яскравому перпендикулярному сонячному світлі, тому часто застосовуються у регіонах з помітною сонячною інсоляцією. ККД становить від 18 до 23% [20].

Полікристалічні елементи є менш ефективними та більш дешевими варіантами. Їх виготовляють зазвичай з менш очищеного кремнію, або взагалі із перероблених матеріалів, методом поступового охолодження. Це суттєво зменшує витрати на виготовлення.

Через свою будову, полікристали постійно затримують електрони між кристалічними зернами, що зменшує ККД, але і водночас підвищує їх енергоефективність. Вони краще працюють у похмуру погоду та при розсіяному світлі. Їх можна легко розрізнити за світло-блакитним кольором та відсутністю зрі-

заних кутів у фотоелементів. ККД таких панелей становить близько 14-18% [20].

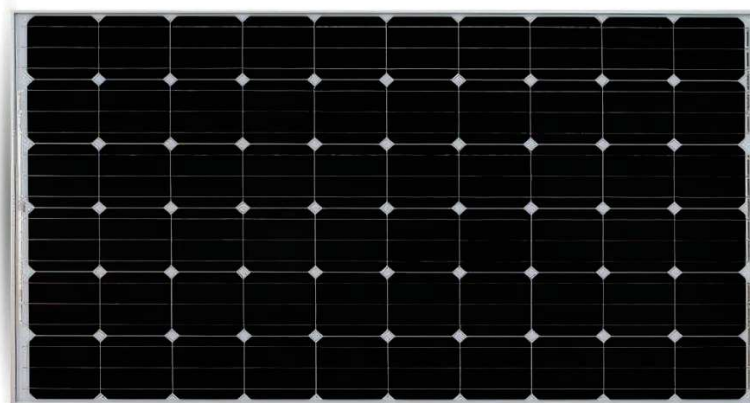


Рисунок 1.10 – Монокристалічна сонячна панель  
Longi Solar LR5-54HTH-435M [21]

Тонкоплівні сонячні панелі виготовляють на основі телурида кадмію, або аморфного кремнію. Ці матеріали наносяться тонким шаром на метал, скло або навіть полімер. Головною особливістю таких рішень є їх гнучка форма, що робить їх легшими у виробництві, та зручнішими у використанні. Вони краще працюють при низькій освітленості, та високих температурах. Тому часто застосовуються як елементи портативних систем. ККД аморфних панелей знаходиться у межах від 8 до 13% [17].

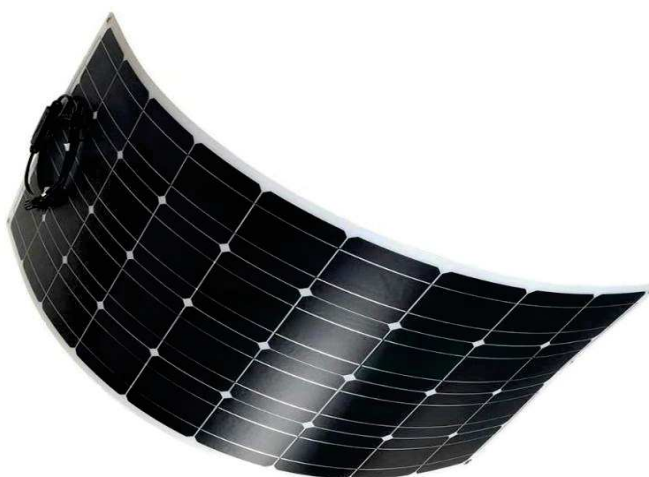


Рисунок 1.11 – Тонкоплівна сонячна панель  
Volt Polska MONO FLEX 200W 18V [22]

Починаючи з 2015 року, починає набирати популярність нове інженерно-технічне рішення – двосторонні (біфіціальні) сонячні панелі, зображення яких проілюстровано на рис. 1.12. На момент 2023 року, 40% від усіх встановлених сонячних модулів були саме двосторонніми.

Передня поверхня у цих батареях така ж, як і у монокристалічних. Вона вкрита загартованим склом та антивідбивним покриттям. Проте нижня сторона виконана за допомогою адаптованої контактної сітки. Тут використовується дещо інша оптика, спрямована на ефективнішу роботу з відбитим світлом. Тому ці панелі краще працюють взимку, коли все вкрите снігом. Також доцільно їх розміщувати над поверхнями з хорошою відбивною здатністю, такими як: світлий щебінь, гравій, білий бетон чи плитка [23].



Рисунок 1.12 – Двосторонні (біфіціальні) сонячні панелі [24]

Ще одним аргументом на користь біфіціальних панелей є те, що дозволяють економити місце, адже на одну панель у них вища ефективність. До того ж вони більш довговічні через міцність конструкції. Однак це технічне рішення є більш дорогим, у порівнянні з монокристалічними панелями, і тому не завжди така пере-

плата є виправданою.

Інвертори потрібні для перетворення постійного струму, що його генерують сонячні панелі у змінний. Це обов'язкова умова для живлення побутових приладів та передачі енергії у мережу. Саме тому більшість інверторів видають напругу 220-230 В, із частотою 50 Гц, а сучасні моделі можуть забезпечувати додатковий захист від коротких замикань [18].

В залежності від класу інвертора, на виході може бути напруга із двома характеристиками синусоїд:

- чиста синусоїда, що є ідеальною формою сигналу для побутового споживача, повторює синусоїду з мережі повністю. Вона сумісна з усіма приладами, стабільна та безпечна, однак є помітно дорожчою.

- модифікована синусоїда, яка є більш спрощеною та здешевленою версією чистої. Її ціна – основна перевага, проте якість вихідного сигналу обмежує спектр застосування. Інвертори з модифікованою синусоїдою можна застосовувати для живлення простих приладів: зарядок, ламп, обігрівачів тощо. Проте надійність інверторів з модифікованою синусоїдою в цілому змушує бажати кращого, і в деяких випадках призводить до перегріву та зменшення ресурсу приладів [25].

Ілюстраційно типи синусоїд приведені на рис. 1.13.

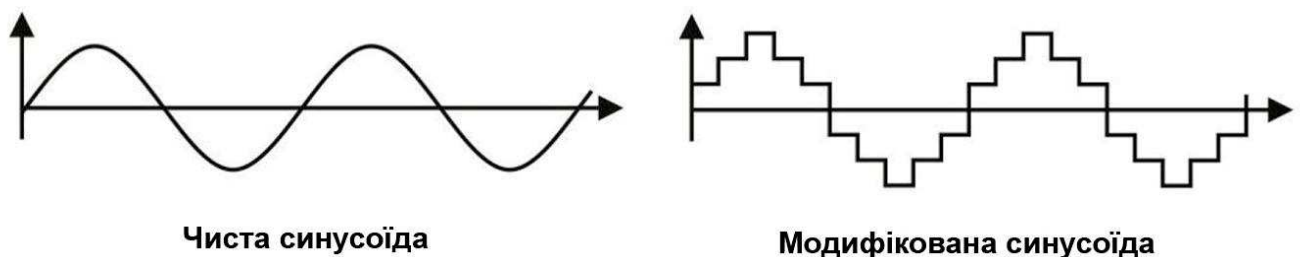


Рисунок 1.13 – Типи синусоїд в інверторах [25]

Варто зазначити, що на ринку присутні моделі із прямокутною синусоїдою, яка є ще більш спрощеним варіантом, але від того і менш надійним. На сьогоднішній день такі інвертори практично вийшли з ужитку [25].

В залежності від типу СЕС, інвертори поділяються на кілька груп:

- мережеві інвертори, працюють виключно у мережевих станціях, так як для роботи їм потрібна зовнішня мережа. Вони здійснюють синхронізацію параметрів (частоту, фазу, струм) із зовнішніми параметрами. Як було зазначено вище, мережеві інвертори повністю вимикають станцію, у разі відключення світла.

- автономні інвертори. Встановлюються у незалежних від мережі станціях, через що обов'язково працюють у комбінації з акумуляторами. Мають вбудовану систему зарядки АКБ, проте часто обмежені в потужності, у порівнянні з конкурентами.

- гібридні інвертори, рівно як і сонячні станції загалом, поєднують аспекти мережевих та автономних інверторів. Основними перевагами є контроль пріоритету споживання електроенергії, та можливість віддачі надлишків до мережі. Хоча вони є дорожчими ніж їхні аналоги, проте забезпечують стабільнішу роботу та захист системи від надзвичайних ситуацій (НС), що робить такі рішення найбільш перспективним для встановлення на гібридних СЕС [15].

- мікроінвертори. Це досить малі пристрої, що підключаються до кожної панелі окремо, при цьому компенсуючи один із недоліків сонячної станції – послідовне з'єднання панелей, завдяки чому відмова однієї панелі не тягне за собою інші. Ці моделі можуть бути встановлені на станціях великої потужності, у випадках коли модулі розташовані під різним кутом, або коли робота СЕС планується у складних умовах (опади, пил, затінення тощо).

З огляду на свої малі розміри (див. рис. 1.14) та потужність, мікроінвертори регулярно використовуються на великих сонячних станціях. Тому що вихід навіть одного стрінга панелей на гігаватній чи мегаватній СЕС може призвести до серйозної просадки по генерації, тому рішення про встановлення окремих ланок управління дозволяє мінімізувати втрати [26].

Окрім терміну експлуатації та класу захисту, ще однією важливою характеристикою інвертора є його ККД, і тому для проектування сонячної станції

необхідно обирати модель зі значенням цього параметру не менше 90% [27].



Рисунок 1.14 – Мікроінвертор EcoFlow PowerStream 800W [28]

Акумуляторні батареї (АКБ) є обов'язковим компонентом будь-якої автономної та гібридної станції. Вони дозволяють використовувати накопичену енергію в періоди обмеженої сонячної генерації, або взагалі її відсутності. Крім того, АКБ можуть виконувати функцію стабілізації електричної системи СЕС під час виникнення нестабільності навантаження, та забезпечувати її роботу у якості резервного живлення. Тому найбільш доречним є вибір літєвих та деяких типів свинцево-кислотних АКБ.

Для живлення сучасних фотоелектричних станцій все частіше використовують літій-залізо-фосфатні ( $\text{LiFePO}_4$ ) акумулятори. Це найновіші, найбільш надійні та довговічні моделі для побутових станцій. Є досить безпечними, мають низьку чутливість до ударів та високу термостабільність. ККД таких батарей може досягати 95-98% на заряд/розряд. Також конструкція АКБ передбачає вбудований BSM-захист (Battery Management System), що зменшує кількість помилок у роботі. Головними недоліками  $\text{LiFePO}_4$  є його ціна та вимогливість до якісного інвертора.

Будова типової літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї зображено на ри. 1.15.

Літій-іонні (Li-ion) АКБ є більш бюджетним аналогом  $\text{LiFePO}_4$ , тому частіше встановлюються у цілях економії. Проте вони мають значно менший ресурс на заряд/розряд (усього від 500 до 1500 циклів), у порівнянні з  $\text{LiFePO}_4$  (де ресурс знаходиться у межах 3000-7000 циклів). Вони більш чутливі до перегріву, гірше працюють при низьких температурах та мають трохи нижчий ККД (90-95%). Однак володіють вищою щільністю енергії (150-250 Вт·год/кг), через що вони є більш доречним варіантом для портативних станцій [29].

Сучасні літій-залізо-іонні АКБ все частіше мають додаткові вбудовані елементи, як наприклад блок керування BSM, порти для взаємодії зі сторонніми приладами, індикатор заряду тощо. Будова типового сучасного АКБ зображена на рис. 1.15.

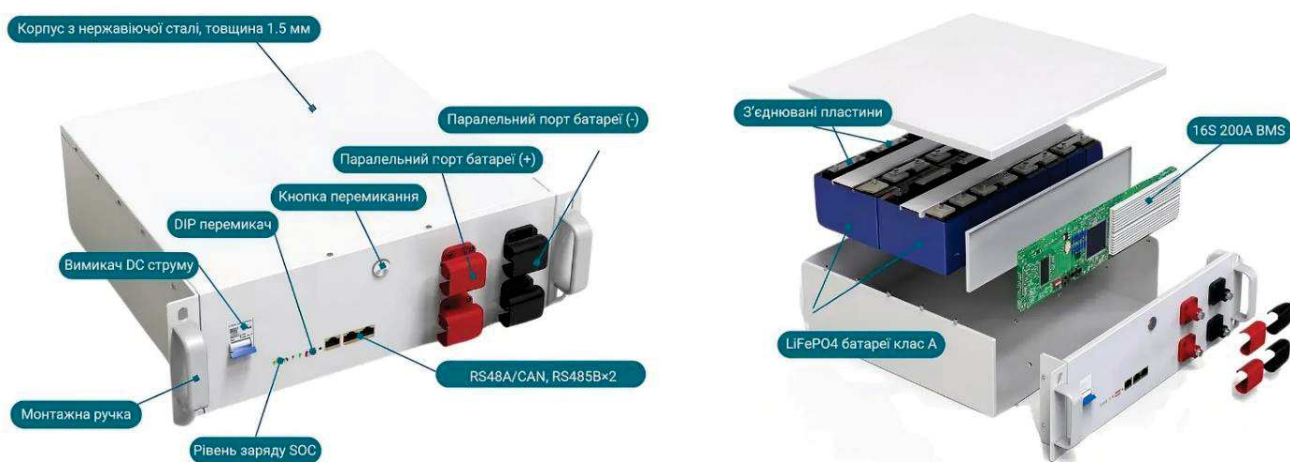


Рисунок 1.15 – Будова АКБ L.Riker  $\text{LiFePO}_4$ ,  
10.24 кВт·год, 48V, 200Ah [30]

Серед свинцево-кислотних АКБ, для СЕС варто розглядати AGM (Absorbent Glass Mat) та GEL (гелеві) акумулятори. Вони є найдешевшими, і водночас найменш довговічними (всього 500-1200 циклів), до того ж негативно реагують на

розряд нижче 50%. У них значно менший ККД (70-85%), повільніший заряд, та відносно велика вага. Проте на відміну від літєвих, можуть працювати при мінусових температурах, і є бажаними для встановлення коли важливою є робота за таких умов. Частіше свинцево кислотні АКБ обираються у випадку, коли бюджет дуже обмежений, або для короткострокового використання (не більше 4 років) [29].

Для того щоб оптимізувати процес зарядки та захистити акумулятор від перерозряду необхідне встановлення контролера.

Найпростіший контролер використовує широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ). Іншими словами, керування передачею електроенергії відбувається шляхом частих але короткочасних імпульсів, це може відбуватись сотні чи навіть тисячі разів за секунду. Контролер постійно здійснює моніторинг напруги на АКБ, і якщо вона розряджена – імпульси будуть довгими, а струм тече практично безперервно. З часом заряду імпульси стають все коротшими, а сила струму зменшується [15]. Діаграму ШІМ в залежності від рівня заряду приведено на рис. 1.16.

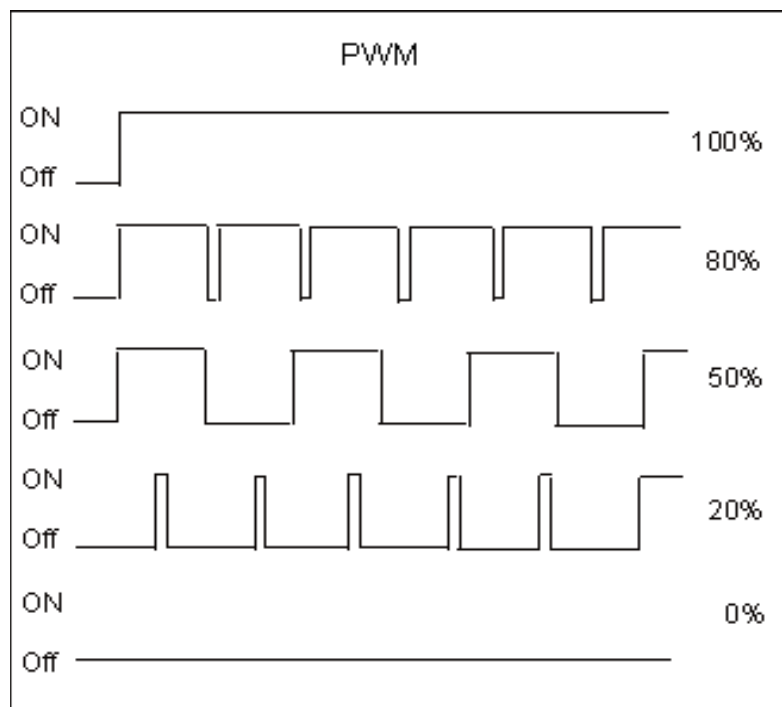


Рисунок 1.16 – Діаграма широтно-імпульсної модуляції [31]

Такі контролери мають обмеження по потужності станції (до 1 кВт), тому що для ефективної роботи ШІМ та запобіганню втрат, напруга панелей повинна наближено дорівнювати напрузі АКБ, інакше через постійне вмикання-вимикання акумулятора напруга буде зрізатись до найменшого значення [15].

MPPT-контролери є більш досконалим варіантом. MPPT (Maximum Power Point Tracking) відстежує максимальну точку потужності, постійно аналізуючи напругу та струм фотоелектричних модулів. Фактично контролер працює як DC-DC перетворювач, адже на вході та на виході потужність зберігається, за рахунок зміщення співвідношення між струмом та напругою. Такий формат роботи суттєво зменшує втрати енергії, і дозволяє розширити потужність станції [15]. Зображення такого контролера приведено на рис. 1.17.



Рисунок 1.17 – MPPT-контролер заряду Juta SY48100A [32]

В сучасних гібридних СЕС MPPT-контролери є практично незамінними компонентами через свою здатність ефективної роботи з АКБ та інверторами напругою вище 48 В. Усе завдяки принципу їх роботи, що дозволяє забезпечити високу швидкість адаптації, розширити загальну гнучкість та надійність усієї системи [32].

На додачу, МРРТ-контролери краще працюють при розсіяному світлі та у хмарну погоду. Їхня здатність відслідковувати нові точки максимальної потужності дозволяє витиснути максимум, навіть в умовах нестачі генерації [33].

## 1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі цієї роботи було розглянуто актуальність СЕС для побутового встановлення. Описано принцип роботи різних типів побутових станцій, способи їх застосування та можливості для реалізації надлишкової енергії. Також було проведено огляд сучасних комплектуючих, та порівняння характеристик обладнання з їх аналогами.

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

### 2.1 Визначення типу станції та регламенту роботи

В рамках цієї роботи було прийнято рішення розробити гібридну сонячну електростанцію. Універсальність та гнучкість робить її чи одним з найкращих рішень для побутового сектору. А в умовах частих відключень електроенергії, задане технічне рішення дозволить забезпечити потреби споживача протягом значного періоду часу.

Для проєктування гібридної СЕС необхідно зробити наступні кроки:

- розробити структурну схему гібридної СЕС;
- визначити тип та потужність фотоелектричних панелей;
- обрати гібридний інвертор з відповідними характеристиками;
- визначити ємність, тип та модель АКБ;
- визначити тип та модель контролера заряду;
- обрати відповідний двонаправлений лічильник;
- обрати надійний обмежувач перенапруг;
- розробити об'ємну модель, на якій буде зображено розміщення фотоелектричних модулів;
- розробити систему кріплень сонячних панелей.

### 2.2 Розробка структурної схеми

Створення структурної блок-схеми – найважливіший етап розробки гібридної СЕС. Адже вона відображає структурну логіку, та взаємозв'язок головних компонентів. Дозволяє сформулювати уявлення про функціональну відповідність основних елементів, та напрямок передачі енергії до кожного великого вузла системи.

Структурна схема допомагає спростити проєктування, налаштування, та ви-

явити потенційно слабкі місця на етапі розробки.

Тому на основі існуючих технічних рішень, було розроблено структурну схему, яка включає: сонячні панелі, контролер заряду, споживачів постійного та змінного струму, інвертор, лічильник та живлення від мережі [15].

Структурна схема гібридної СЕС для побутового використання представлена на рис. 2.1.

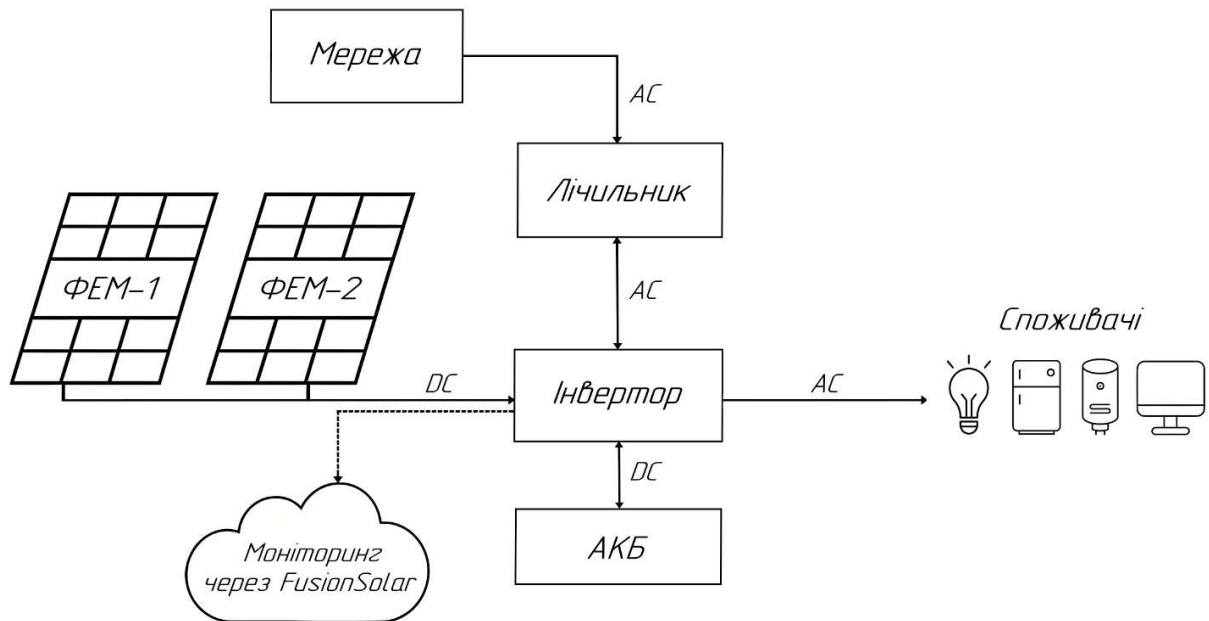


Рисунок 2.1 – Структурна схема гібридної сонячної електростанції

У відповідності з приведеною вище схемою, принцип роботи станції є наступним. Фотоелектричні модулі генерують постійний струм, за наявності необхідного рівня сонячного випромінювання. Далі цей струм надходить напряму до інвертора, що оснащений вбудованим MPPT-контролером. Інвертор у заданій схемі виконує роль центральної керуючої складової, перетворюючи струм із сонячних панелей у змінний, напругою 230 В. Як наслідок цей струм може бути використаний споживачами.

Гібридна СЕС проєктується з доступом до зовнішньої мережі, тому було прийнято рішення здійснити підключення за «зеленим» тарифом.

У такому разі, інвертор постійно синхронізується з мережею, та відповідає за подачу надлишкової енергії до лінії електропередач (ЛЕП), якщо рівень генерації панелей здатен забезпечити потреби споживача. Тому, в умовах профіциту енергії інвертор також направляє її частину до акумуляторів.

Варто зазначити, що в цій конфігурації акумулятори заряджаються виключно через фотоелектричні модулі. Це дозволяє зменшити використання електроенергії з мережі, а також зняти деяке навантаження з інвертора.

Контролер заряду в даному випадку є виключно складовою інвертора, тому встановлення окремого пристрою система не потребує. До того ж, акумуляторна батарея буде обиратись з максимальною відповідністю до параметрів інвертора.

Лічильник обов'язково має бути двонаправленим, адже необхідно враховувати спожиту з мережі енергію, а також ту, що надходить до неї.

Моніторинг споживаної, виробленої та мережевої електроенергії планується забезпечити через мобільний додаток FusionSolar. Застосунок від компанії Huawei є найбільш зручним варіантом для цієї конфігурації [34].

### 2.3 Вибір сонячної панелі

Обираючи серед можливих ринкових варіантів, було прийнято рішення зупинитись на сонячній панелі – JA SOLAR JAM72S30-565LR (див. рис. 2.2). JA Solar – це відомий виробник з визначною репутацією у сфері сонячної енергетики, що гарантує стабільну та ефективну роботу фотомодулів до 12 років, та збереження майже 85% ефективності навіть через 25 років експлуатації.

JA SOLAR JAM72S30-565LR – це монокристалічна сонячна панель, з номінальною потужністю 565 Вт, що забезпечує один з найкращих показників енергоефективності серед інших ринкових моделей [35].

Графік її фолт-амперної характеристики приведено на рис. 2.3.

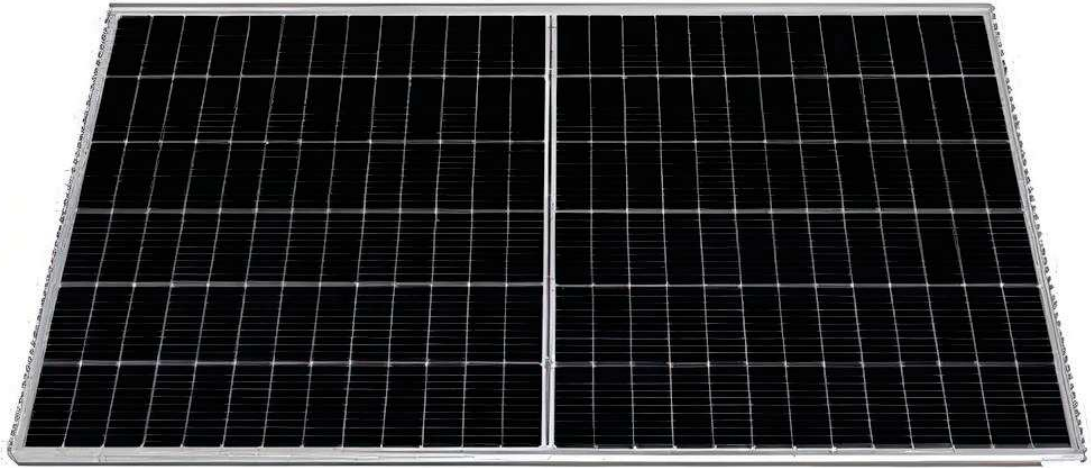


Рисунок 2.2 – Сонячна панель JA SOLAR JAM72S30-565LR [35]

Для проектування гібридної СЕС надзвичайно важливим є врахування технічних характеристик обраних фотоелектричних модулів, тому що це прямо впливає на ефективність роботи всієї станції. Основні характеристики приведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики фотомодуля JA SOLAR JAM72S30-565LR [35]

Електричні характеристики за стандартних умов тестування	
Максимальна потужність	565 Вт
Струм при максимальній потужності	13,56 А
Напруга при максимальній потужності	41,68 В
Струм холостого ходу	14,31 А
Напруга холостого ходу	50,5 В
ККД	21,4 %
Відхилення по потужності	3%

Продовження таблиці 2.1

Електричні характеристики за робочої температури комірки ( $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ )	
Максимальна потужність	428 Вт
Струм при максимальній потужності	10,85 А
Напруга при максимальній потужності	39,44 В
Струм холостого ходу	11,45 А
Напруга холостого ходу	47,79 В
Максимальна напруга системи	1500 В
Максимальний струм панелі	25 А
Фізичні характеристики	
Розміри	2333×1134×30 мм
Вага	28 кг
Клас захисту	IP 68
Кількість комірок	144
Діапазон робочих температур	від $-40$ до $+85 \text{ }^\circ\text{C}$

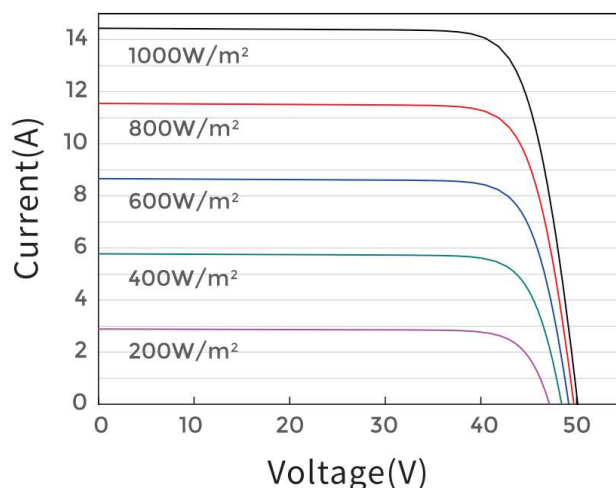


Рисунок 2.3 – Вольт-амперна характеристика в залежності від освітленості [35]

Вибір сонячних панелей є основою для підбору компонентів станції. Тому інші складові системи будуть обиратись на основі зазначених вище характеристик.

## 2.4 Вибір інвертора

До вибору інвертора необхідно підходити з особливою відповідальністю. Цей пристрій є центральним «мозком» системи, вузлом для розподілу потоків енергії, і від його характеристик залежить безпека, ефективність та довговічність роботи СЕС.

Зважаючи на характеристики фотомодулів, умов роботи станції та географічне розташування об'єкта, до встановлення було обрано гібридний однофазний інвертор Huawei SUN2000-8K-LC0, який зображено на рис. 2.4 [36].



Рисунок 2.4 – Гібридний інвертор Huawei SUN2000-8K-LC0 [36]

Huawei SUN2000-8K-LC0 – сучасний багатозадачний інвертор, призначений для результативного керування побутовими гібридними СЕС. Одними з найголовніших його переваг є високий рівень технологічності, надійності та ефективності. Також інвертор здатен забезпечити достатньо широкий спектр заходів безпеки, зокрема захист від перенапруг та дугових струмів.

Інвертори SUN2000 працюють при високій напрузі, при цьому сильно змен-

шуючи величину сили струму. За високих значень напруги система витрачає менше енергії на нагрівання, та здатна ефективніше її використовувати, досягаючи надвисоких значень ККД (до 98 %). Це чітко ілюструє графік ефективності в залежності від навантаження, зображений на рис. 2.5.

Високовольтний тип інвертора також позитивно впливає на його компактність, зберігаючи місце для решти компонентів. Але при цьому суттєво підвищуються вимоги до монтажу та експлуатації обладнання. Робота з високим вольтажем потребує відповідної кваліфікації від монтажників, щоб вони могли забезпечити надійність установки, її охолодження та ізоляцію кабелів.

Ще однією вимогою обраного інвертора є обов'язкова наявність якісного обмежувача перенапруг, з наступним виводом його на заземлення [37].

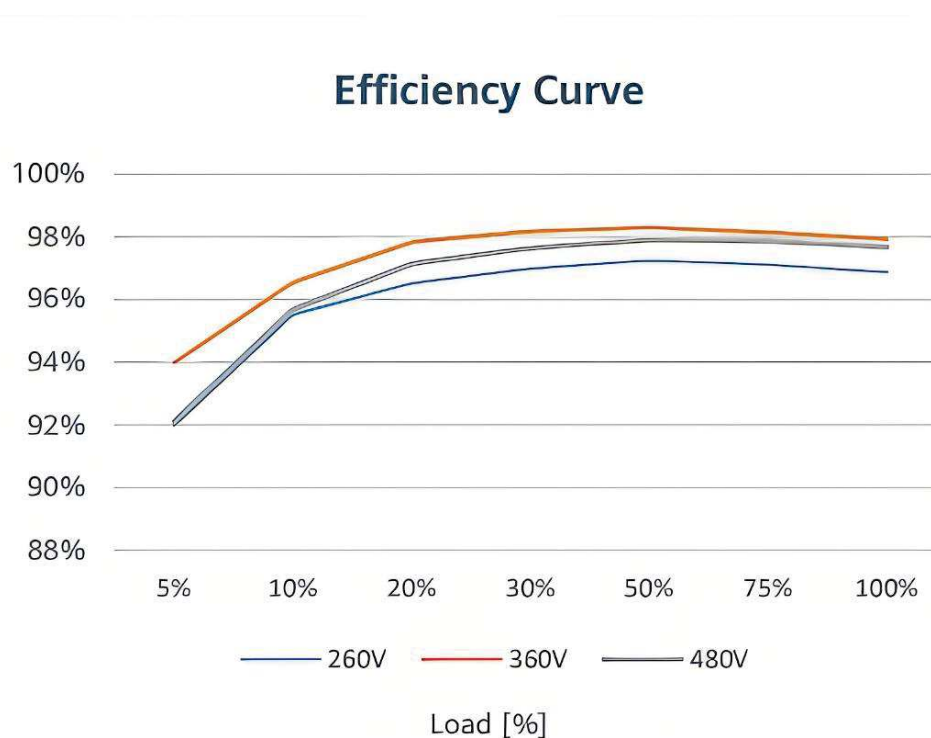


Рисунок 2.5 – Криві ефективності інвертора [37]

Huawei SUN2000-8K-LC0 має три вбудованих MPPT-контролери, це дає можливість підключати одразу до 3 стрінгів сонячних панелей, з різним нахилом та орієнтацією. Детальніше характеристики інвертора розписано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики гібридного однофазного інвертора Huawei SUN2000-8K-LC0 [38]

ККД	98,1 %
Номінальна потужність	8 кВт
Параметри входу від сонячних панелей	
Макс. допустима потужність фотомодулів	12 кВт
Макс. вхідна напруга	600 В
Стартова напруга	50 В
Номінальна вхідна напруга	360 В
Діапазон робочої напруги МРРТ-контролерів	40 - 560 В
Макс. вхідний струм на контролер	16 А
Макс. струм короткого замикання	20 А
Параметри входу на АКБ	
Діапазон робочої напруги	350 - 560 В
Макс. струм	25 А
Макс. потужність заряд/розряд	8 кВт
Вихід в мережу	
Номінальна вихідна потужність	8 кВт
Номінальна вихідна напруга	220/230/240 В; N+PE
Макс. вихідний струм	40 А
Регульований коеф. потужності	0,8 на випередження/відставання
Фізичні характеристики	
Розміри	425×376.5×150 мм

Продовження таблиці 2.2

Вага	14,5 кг
Клас захисту	IP 66
Діапазон робочих температур	від -25 до +60 °С
Термін придатності	до 20 років

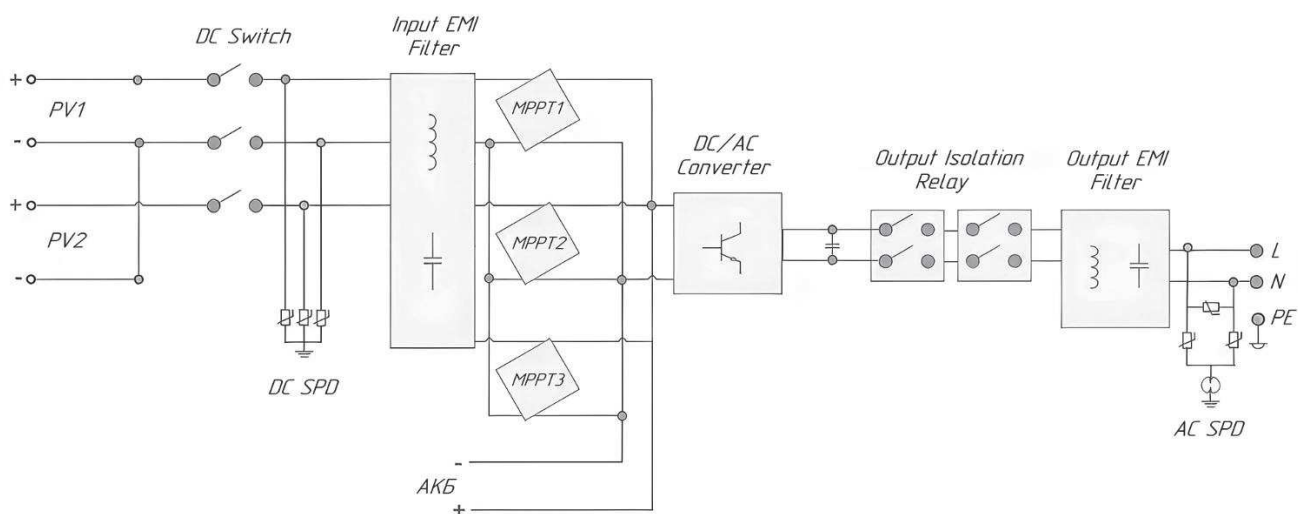


Рисунок 2.6 – Електрична схема інвертора  
Huawei SUN2000-8K-LC0 [37]

Вибір інвертора потужністю 8 кВт є універсальним рішенням, особливо враховуючи той факт, що максимальна потужність встановленої станції може досягати 12 кВт. Це забезпечується шляхом взаємодії електронних компонентів інвертора (див. рис 2.6) та загальною гнучкістю його роботи.

В проєкті сонячної станції, обмеження розмірів території та її планування суттєво обмежують кількість встановлених фотомодулів. На додачу, невелике недовантаження інвертора має позитивний вплив на ефективність його роботи, що також знизить можливі ризики для безпеки станції [36].

## 2.5 Вибір акумуляторної батареї

Враховуючи архітектуру станції та принцип її роботи, орієнтованого на використання обраного раніше інвертора Huawei SUN2000-8K-LC0. Було прийнято рішення, що доцільним є встановлення акумуляторної батареї Huawei LUNA2000-10-S0. Зображення акумуляторної батареї приведено на рис. 2.7 [39].



Рисунок 2.7 – Акумуляторна батарея Huawei LUNA2000-10-S0 [39]

Ця АКБ є високовольтною, що дозволяє помітно зменшити струми в кабелях, не змінюючи при цьому потужність. Це позитивно відображується на стані струмоведучих частин та самої батареї, так як вони нагріваються значно менше.

Така батарея дозволяє ефективніше заряджати та розряджати її, з меншими втратами ККД. Вона може ефективніше реагувати на зміну навантаження, що підвищує її гнучкість [40]. Характеристики батареї зведені в табл. 2.3.

Однак головним аргументом на користь обраної АКБ є її інтеграція з гібридним інвертором Huawei SUN2000-8K-LC0. Виробник на програмному рівні

забезпечує взаємозв'язок цих двох пристроїв через цифровий інтерфейс – CAN (Controller Area Network). Тому для підключення достатньо здійснити фізичне підключення складових. Напруга і струм відповідають параметрам інвертора (див. рис. 2.8 [39]).

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики акумуляторної батареї Huawei LUNA2000-10-S0 [39]

Номінальна ємність модуля	5 кВт·год
К-ть модулів	2
Макс. вихідна потужність АКБ	5 кВт
Пікова вихідна потужність АКБ	7 кВт (протягом 10 сек.)
Діапазон робочих напруг (однофаз. сист.)	350 - 560 В
Діапазон робочих напруг (трифаз. сист.)	600 - 980 В
Розміри	670×150×960 мм
Вага	113,8 кг (один модуль - 50 кг)
Діапазон робочих температур	від -25 до +55 °С
Клас захисту	IP 66
Тип АКБ	LiFePO <sub>4</sub>
К-ть циклів заряд/розряд	більше 6000
Термін придатності	10 років

Обрана батарея має вмонтований блок керування (BMS), та індикатор заряду (SOC). У результаті, система не потребує додаткового встановлення контролера за-

ряду, типу MPPT. Взаємодія цих двох компонентів повністю забезпечується їх архітектурою та сумісністю між собою.

Модульна будова батареї дозволяє розширити ємність АКБ у майбутньому, шляхом встановлення додаткових модулів.

Huawei відзначає, що корисна ємність цієї моделі фактично дорівнює номінальній, і АКБ здатна підтримувати 100% розряд, не зашкоджуючи при цьому ефективності її роботи [39].

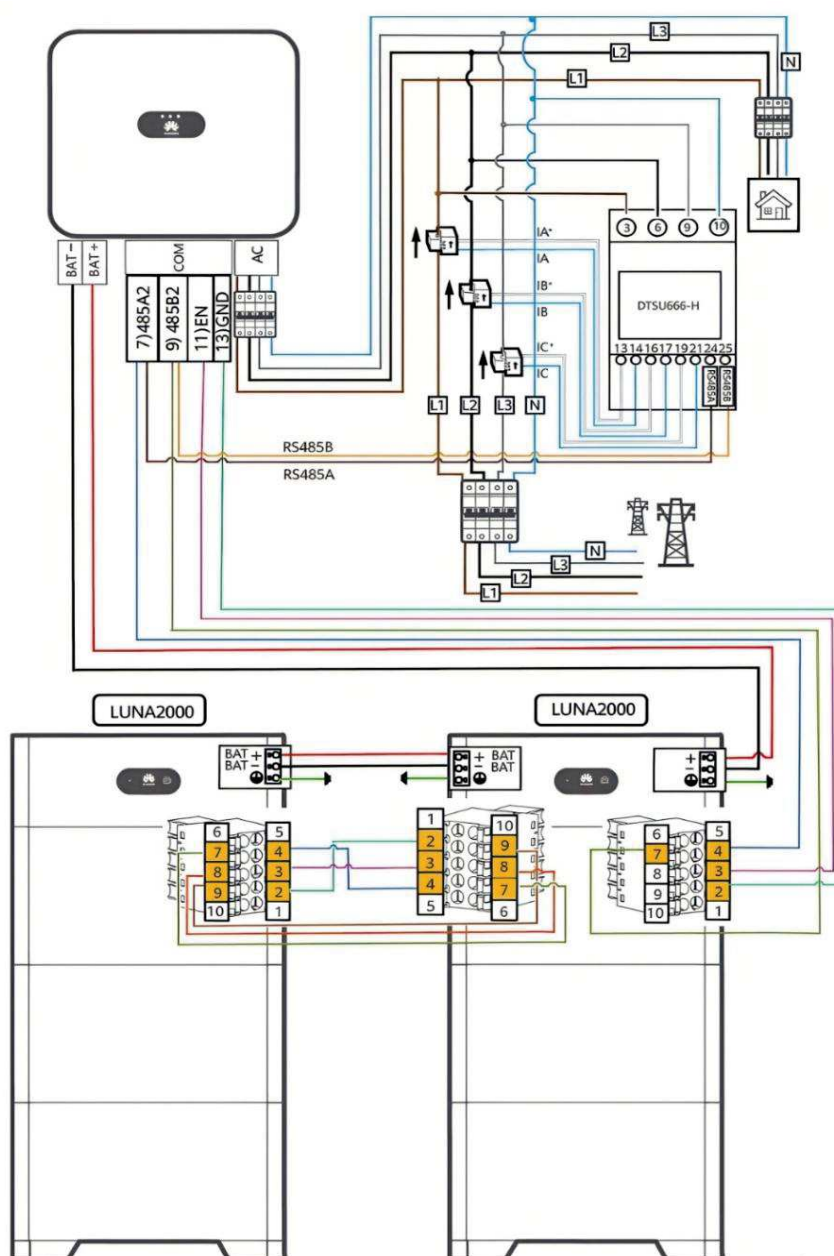


Рисунок 2.8 – Схема підключення Huawei LUNA2000-10-S0 до інвертора [39]

Ще однією перевагою обраного інвертора та АКБ є рівень шуму під час роботи, що не перевищує 30 дБ. Це значення еквівалентне шуму лисття, і є цілком комфортним для звстосування в побуті [39].

## 2.6 Вибір лічильника

Як уже було зазначено, гібридна СЕС проєктується з майбутнім підключенням до зеленого тарифу. Тому правильний вибір лічильника є надзвичайно важливим не тільки з точки зору ефективності, а й правильної взаємодії з ОСП.

Згідно з Постановою НКРЕКП «Про затвердження правил роздрібного ринку електричної енергії» споживач зобов'язаний використовувати сертифікований лічильник з вбудованою автоматизованою системою комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Лічильник повинен відповідати основним технічним вимогам ОСП (зокрема мати клас точності не менше 1.0). Також бажаним є наявність вбудованого модему для передачі даних, та підтримки багатотарифного режиму [41].

Враховуючи усі вимоги, було прийнято рішення обрати однофазний двонаправлений лічильник GAMA 100 G1B.164.220.F3.B2.P4.C310.V1 (див. рис. 2.9).

GAMA 100 має вбудований модем для дистанційної передачі даних MLC 5.10. За своїми технічними параметрами цей прилад сумісний з обраним інвертором Huawei SUN2000-8K-LC0, і здатен забезпечити повний двонаправлений облік електричної енергії. Лічильник підтримує інтерфейс RS485 для передачі даних, зчитування даних через вбудований оптичний порт (IEC 62056-21), а також володіє необхідними сертифікатами, з точки зору законодавства [42].

Технічні характеристики двонаправленого лічильника GAMA 100 представлені в табл. 2.4.



Рисунок 2.9 – Двонаправлений лічильник GAMA 100  
G1B.164.220.F3.B2.P4.C310.V1 [42]

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики лічильника GAMA 100  
G1B.164.220.F3.B2.P4.C310.V1 [42]

Номінальна напруга	230 В
Допустимі коливання напруги	від -20 до +15 %
Номінальний струм	5 А
Макс. струм	100 А
Клас точності	1.0
Споживана потужність	0,75 Вт
Номінальна частота струму	50 Гц
Поріг чутливості	0,4 % In
Кількість підключених тарифів	1-4
Інтервал між повітками	16 років

#### Продовження таблиці 2.4

Термін служби	24 роки
Збереження даних за відсутності живлення	2 роки при $t = 60^{\circ}\text{C}$ ; 20 років при $t < 25^{\circ}\text{C}$
Клас захисту	IP 54
Діапазон робочих температур	від $-40$ до $+70^{\circ}\text{C}$
Розміри	180×130×965 мм
Вага	Меше 0,8 кг

Варто зазначити, що відповідно до офіційної публікації НКРЕКП: «Європейська напруга і нові стандарти: що зміниться у Кодексі систем розподілу» в Україні, починаючи з 1 липня 2025 року буде здійснено перехід на номінальну напругу 230/400 В, замість 220/380 В. Ще одним нововведенням є установка допустимого відхилення напруги у межах  $\pm 10\%$  (від 207 до 253 В). Діапазон напруг лічильника є дещо ширшим за допустимі значення, що підкреслює його універсальність у цьому контексті [43].

#### 2.7 Вибір обмежувача перенапруг

Для забезпечення захисту обладнання від імпульсних перенапруг необхідно правильно обрати обмежувач перенапруг (ОПН). Самі перенапруги можуть бути викликані рядом факторів:

- комутація в мережі внаслідок перемикачів у трансформаторних підстанціях (ТП), або відключень великих споживачів;
- індукція в повітряних лініях через вплив електромагнітного фону, чи атмосферних явищ;
- обрив нейтралі, що спричинає перекіс напруги, і як наслідок - її збільшення;

- удар блискавки, що навіть при непрямому влучанні може миттєво збільшити напругу в проводах.

Саме тому проектування СЕС повинно включати вибір надійного ОПН. Без відповідного захисту під загрозою опиняється не тільки інвертор, АКБ і панелі, але і споживачі [44].

Було прийнято рішення обрати ОВО Bettermann V20-C 1+NPE-280. Цей ОПН є двополюсним, та призначений для встановлення у приватних будинках із однофазним живленням. Зображення ОПН приведено на рис. 2.10 [45].



Рисунок 2.10 – Обмежувач перенапруг OBO Bettermann V20-C 1+NPE-280 [45]

Принцип роботи OBO Bettermann V20-C 1+NPE-280 полягає у закороченні імпульсу напруги на землю. Якщо ОПН фіксує напругу, що суттєво перевищує номінальну (230 В), варистори практично моментально гасять її. Таким чином надлишкова енергія не впливає на роботу обладнання. Після спрацювання варистори повертаються у вихідне положення.

За своїми технічними параметрами обраний ОПН підходить для роботи з гібридними СЕС, та цілком відповідає технічним вимогам. Також конфігурація ОПН (1+NPE) є бажаною для однофазного живлення за системами TN-C-S та TN-S, що часто зустрічаються в побутовому секторі України. Технічні характеристики приведені в табл. 2.5 [45].

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики обмежувача перенапруг ОВО Bettermann V20-C 1+NPE-280 [45]

Номінальна напруга	230 В
Тип	T2 (клас С)
Макс. робоча напруга	280 В
Час спрацювання	< 25 нс
Номінальний струм	20 кА
Макс. струм розряду	40 кА (8/20 мкс)
Рівень захисту від напруги	< 1,3 кВТ
Діапазон робочих температур	від -40 до +80 °С
Клас захисту	IP 20

Для забезпечення захисту окремих елементів гібридної СЕС та її мережевого з'єднання, обов'язково мають бути встановлені автоматичні вимикачі (АВ). Якщо значення струму перевищує допустиме, вимикачі забезпечують своєчасне відключення від джерела. Це також запобігає пошкодженню компонентів системи та струмоведучих частин під час КЗ.

У відповідності з ДСТУ EN 60898-1:2014, для побутових мереж достатньо буде встановити на лінії інвертор-споживач АВ з класу С, номіналом 32 А. Вимикач стане додатковим захистом від струму КЗ, у разі поломки інвертора. Захист від ви-

сокої напруги на цій лінії уже забезпечено встановленням ОПН.

Між АКБ та інвертором необхідно встановити вимикач постійного струму з номіналом від 32 до 40 А. Він дозволить вимикати АКБ локально у разі поломки, щоб не довелося втручатися у роботу інших компонентів. Хоча АКБ та інвертор і мають чимало вбудованих засобів захисту, встановлення вимикача на цій позиції все ж таки є бажаним.

Передбачається застосування вимикача змінного струму з номіналом 6 А на лінії з двонаправленим лічильником. Цей АВ розрахований на менші струми, відповідно краще підійде для локального захисту малопотужної лінії [46].

## 2.8 Розробка моделі розміщення сонячних панелей

Важливим етапом процесу розробки побутової СЕС є створення її тривимірної моделі. Вона дозволила б наочно показати місце розташування сонячних модулів, та спосіб їх закріплення. Загалом призначення об'ємного моделювання – показати яким чином станція буде виглядати після реалізації монтажної частини.

У результаті було прийнято рішення про розміщення фотоелектричних модулів на даху приватного будинку. На це вплинули планувальні обмеження прилеглої території, які характеризуються малою площею, нерівномірністю ландшафту, густим розміщенням надбудов та складових господарства.

За допомогою програмного забезпечення SOLIDWORKS було побудовано об'ємну модель, зображення якої приведено на рис. 2.11. і 2.12. у різних проєкціях.



Рисунок 2.11 – Розміщення фотоелектричних модулів (загальний вигляд)

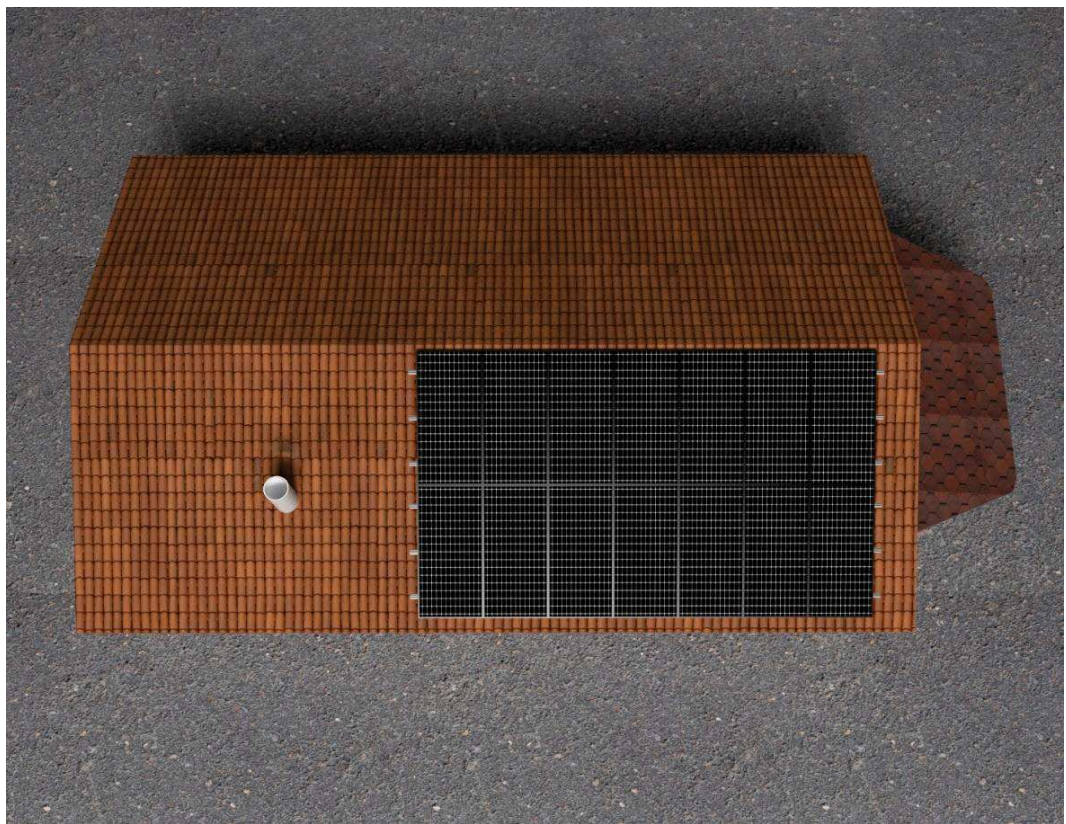


Рисунок 2.12 – Розміщення фотоелектричних модулів (вигляд зверху)

Моделювання здійснювалось на основі геометричних параметрів будівлі, враховуючи форму даху та його нахил. Важливим фактором також стало розміщення будинку відносно сторін горизонту.

Розташування димоходу на даху вводить обмеження на кількість фотоелектричних панелей. Це обумовлюється забезпеченням ефективної роботи панелей, для цього необхідно зменшити імовірність затінення, і забезпечити необхідну відстань до найближчого об'єкту. У результаті було встановлено 14 фотомодулів зі сторони входу в будинок. Орієнтація панелей розташована практично прямо на південь.

Форма та розміри даху дозволяють встановити ще 4 панелі, з іншої сторони від димоходу. Однак їх довелося б під'єднувати окремим стрінгом, і хоча обраний інвертор Huawei LUNA2000-10-S0 здатен підтримувати стабільну роботу одразу трьох стрінгів, було прийнято рішення обмежитись заданою кількістю. Навантаження на інверторн неминуче збільшиться, що може призвести до потреби заміни його на більш потужну версію, що потенційно може потягнути за собою заміну інших компонентів, і як наслідок, – зріст витрат на реалізацію.

## 2.9 Розробка системи кріплення сонячних панелей

Сонячні модулі потрібно надійно закріпити на похилій площині даху. Тому вздовж передбаченого місця для монтажу, розміщуються розроблені монтажні профілі, виконані зі сплаву алюмінію АД31 (авіалію). Що надає їм відносну міцність, корозостійкість та надійність, водночас зберігаючи малу вагу. Легкість є досить важливим параметром у цьому контексті, через обмежену вантажопідйомність черепиці, з якої зроблено перекриття, та несучих частин даху.

Утримувати панелі на місці допоможуть розроблені крайні затискачі. Що розташовуються на крайніх профілях, по обидві сторони усієї площини сонячних панелей. Фотомодулі виставляються поперек профілів, при цьому залишаючи необхідні зазори для надійності конструкції. Де вони й фіксуються за допомогою

вкручування L-подібного кронштейну за допомогою гвинта. Таким чином монтажна гайка здатна забезпечити надійне з'єднання з профілем, водночас фіксує панель. Зображення 3D-моделі крайнього затискача приведено на рис. 2.13, і також на рис. 2.14 – затискач в зборці з монтажним профілем.



Рисунок 2.13 – Крайній затискач для сонячної панелі

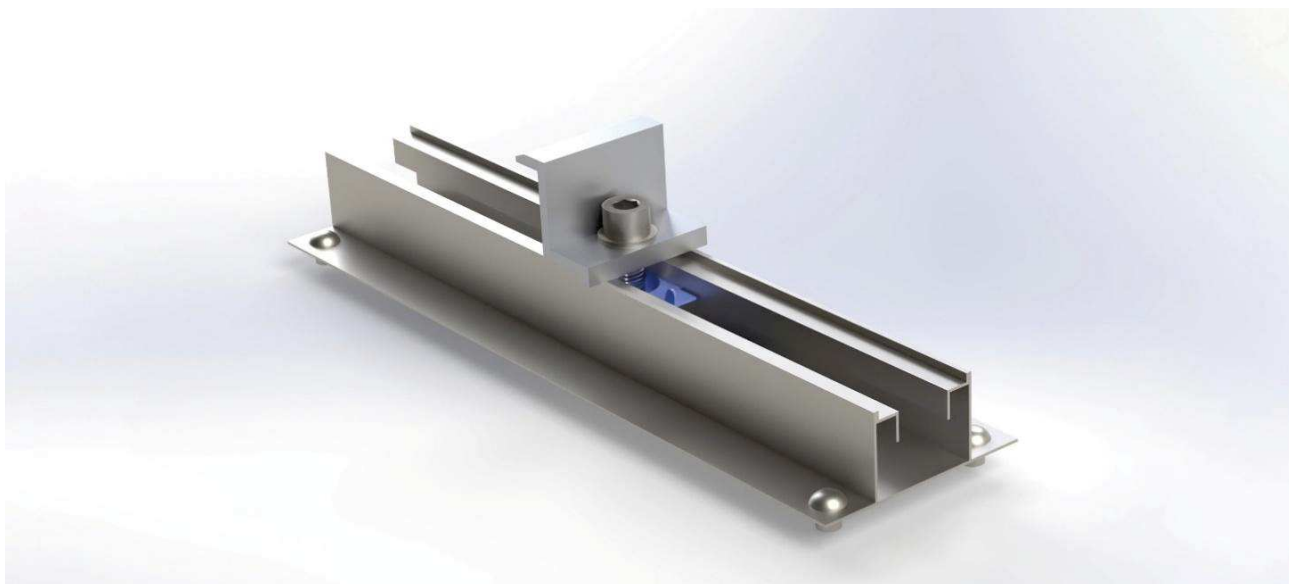


Рисунок 2.14 – Збірна модель крайнього затискача та монтажного профілю

Фотоелектричні модулі також повинні бути закріплені у міжпанельному просторі. Для цього було видозмінено конструкцію крайнього затискача, використавши розроблений кронштейн V-подібної форми (див. рис. 2.15). Таке рішення обумовлено тим, що розташованому між панелей затискачу необхідно одночасно утримувати наступну та попередню панель.

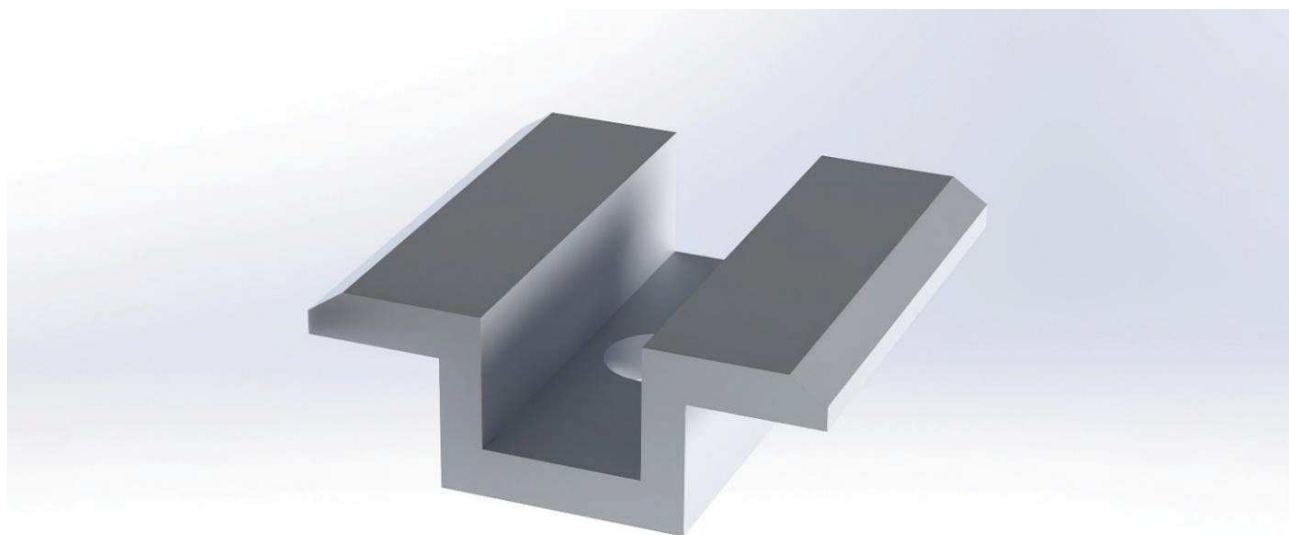


Рисунок 2.15 – V-подібний кронштейн для міжпанельного затискача

Загалом для реалізації процесу монтажу необхідно 48 панельних затискачів, серед яких:

- 36 міжпанельних затискачів;
- 12 крайніх затискачів;

Окрім цього, для надійної фіксації, необхідно по периметру розмістити 48 монтажних профілів таким чином, щоб кожна панель фіксувалась з лівої та правої сторони. Враховуючи розміри панелей та затискачів, кожен профіль, розташований повздовж даху повинен знаходитись на відстані не менше 1,5 метра один від одного.

Таким чином, використовуючи розроблені елементи конструкції, сонячні мо-

дулі можуть бути надійно зафіксовані. Це дозволить їм ефективно генерувати електроенергію, навіть у несприятливих погодніх умовах.

## 2.10 Висновки до другого розділу

У другому розділі цієї роботи було розроблено структурну схему гібридної сонячної електростанції для побутового використання. Обрано необхідне обладнання: сонячні панелі, інвертор, акумулятор, двонаправлений лічильник та обмежувач перенапруг, враховуючи технічні характеристики та обмеження. Створено об'ємну модель із зображенням на ній місця та способу встановлення фотоелектричних модулів, та розроблено систему кріплень для сонячних панелей, з метою їх надійної фіксації в місці розміщення.

## 3 РОЗРАХУНКИ ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ПОБУТОВОГО ВИКОРИСТАННЯ

### 3.1 Розрахунок сонячної інсоляції

Сонячна інсоляція – термін, що характеризує кількість сонячної енергії, розподіленої по поверхні за конкретний проміжок часу. Цей показник повністю залежний від погодних умов, орієнтації панелей, кута нахилу та місця географічного розташування поверхні.

Інсоляція є одним з найголовніших параметрів, що слід враховувати під час проектування фотоелектричних систем, адже вона показує кількість енергії, яку здатні виробити сонячні панелі. Відповідно, зі збільшенням показника інсоляції – зростає і фактична генерація електроенергії.

В Україні значення середньорічної інсоляції знаходяться на сприятливому рівні, і згідно даних від Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), становить 1350-1450 кВт·год/м<sup>2</sup> на поверхню під кутом 30°, та 1200-1300 кВт·год/м<sup>2</sup> - на горизонтальну. Для забезпечення максимальної ефективності, поверхня приймача сонячного випромінювання повинна розташовуватись з орієнтацією на південь. Тому на мапі сонячної інсоляції України (див. рис. 3.1.) чітко видно, що зі зміщенням на південь, потенційна ефективність СЕС буде зростати [47].

Для визначення фактичних показників сонячної інсоляції необхідно визначити основні параметри. Місце розташування СЕС у місті Хмельницькому, координати якого: 49.42° пн. ш., 27.00° сх. д. Кут нахилу сонячних панелей - 20°, що обумовлено конструкцією дахової поверхні, на якій розміщуються модулі. А також тип технології виготовлення батарей – монокристал, та загальну номінальну потужність, яку можна визначити за формулою:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{ном}} \cdot N = 565 \cdot 14 = 7,91 \text{ кВт}; \quad (3.1)$$

де  $P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність фотомодуля, Вт;  $N$  – їх кількість.

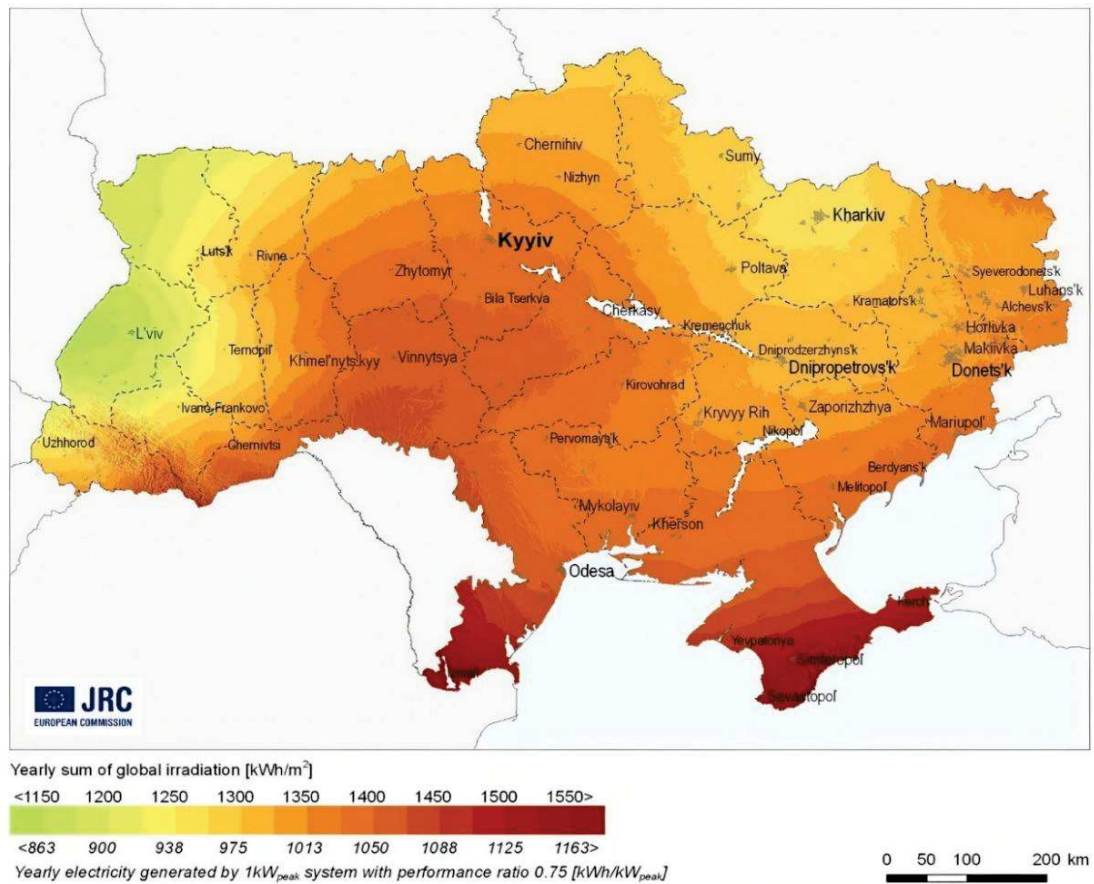


Рисунок 3.1 – Мапа сонячної інсоляції України [47]

У результаті, для заданих умов середньорічні показники інсоляції склали 1315 кВт·год/м<sup>2</sup>. Що є досить непоганим значенням у порівнянні з північно-західними та західними регіонами України. Середні покази за кожен місяць приведено у табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Середньомісячні показники інсоляції м. Хмельницького [47]

Місяць	Рівень інсоляції, кВт·год/м <sup>2</sup>
Січень	40
Лютий	64

### Продовження таблиці 3.1

Березень	107
Квітень	143
Травень	168
Червень	176
Липень	172
Серпень	153
Вересень	119
Жовтень	90
Листопад	48
Грудень	35

### 3.2 Розрахунок генерації електричної енергії

Для того щоб оцінити ступінь ефективності майбутньої сонячної станції, необхідно розрахувати реальний потенціал модулів генерації електричної енергії. Надалі це допоможе визначити рентабельність установки, та межі покриття власних потреб споживачів. Тому для проведення якісної оцінки потрібно враховувати не лише характеристики панелей та рівень інсоляції, а й втрати під час роботи різних компонентів системи та кліматичні особливості.

Для розрахунку обсягу річної потенційної енергії можна застосувати наступну формулу [48]:

$$E_{р.пот} = G \cdot S_{мод} \cdot \eta_{мод} \cdot N; \quad (3.2)$$

$$E_{р.пот} = 1\,315 \cdot 2,645 \cdot 0,214 \cdot 14 = 10420 \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

де  $G$  – річна інсоляція, кВт·год/м<sup>2</sup>;  $S_{мод}$  – площа фотомодуля, м<sup>2</sup>;  $\eta_{мод}$  – ККД.

Кліматичні умови мають свій вплив на роботу сонячних панелей завдяки принципу їх роботи, заснованому на поглинанні сонячного випромінювання. Вони можуть генерувати енергію як від прямого падіння променів, так і від розсіяного [28].

Таким чином для охарактеризації цього значення існує коефіцієнт альbedo. Визначається десятковим дробом (від 0 до 1), і фактично показує співвідношення між відбитим від поверхні сонячним випромінюванням, та випромінюванням, що потрапляє на конкретну поверхню.

Хоч альbedo має відносно невеликий вплив на роботу модулів, розташування станції поряд з поверхнями з високим значенням відбиття, таких як гравій чи бетон, може трохи збільшити величину сонячної енергії, котра поглинається безпосередньо панеллю. У холодну пору року такою поверхнею очевидно буде сніг, який має досить високий коефіцієнт альbedo (див. табл. 3.2).

Найбільш виражений ефект приросту генерації спостерігається у двосторонніх фотомодулів. Взимку їх ефективність може підвищитись до 20-30%, у порівнянні з односторонніми моделями [48].

Таблиця 3.2 – Типові значення коефіцієнту альbedo для різних поверхонь [48]

Свіжий сніг	0,80 – 0,95
Старий сніг	0,40 – 0,70
Трава, листя	0,15 – 0,25
Земля	0,04 – 0,14
Черепиця	0,15
Пісок білий	0,60
Фарба (біла акрилова)	0,80
Асфальтове покриття	0,05 – 0,10

Продовження таблиці 3.2

Бетон / світлий гравій	0,20 – 0,40
Вода	0,05 – 0,08

Матеріалом даху, на який розміщено сонячні панелі є черепиця, що володіє досить низьким рівнем відбиття, і в такому випадку вплив розсіяного світла буде незначним. І навіть з врахуванням снігових опадів у зимову пору року, вплив коефіцієнта відбиття не перевищує 3 %. Однак в процесі моделювання роботи СЕС бажано його також врахувати, щоб отримати більш точні результати.

Робота обладнання неминуче призводить до втрат потужності. Номінальна робоча температура панелей – 45 °С, тому при її збільшенні модуль поступово знижує свою ефективність. Панелі також можуть бути затінені сторонніми об'єктами, вкриті снігом, забруднені пилом, брудом або навіть піском. Струмоведачі частини мають обмежений ККД, через що втрати на нагрівання та передачу мають своє місце. Необхідно враховувати, що інвертор хоч і має високий рівень ефективності, все ж втрачає деяку частину енергії під час перетворення струму. До того ж, з часом компоненти станції фізично зношуються, і це призводить до збільшення сумарних втрат ефективності. Основні типи втрат зведені у таблицю 3.3 [49].

Таблиця 3.3 – Основні втрати СЕС у процесі експлуатації [49]

Втрати в струмоведачих частинах	±3 %
Втрати на перетворення струму	±2 %
Деградація обладнання	±3 %
Втрати в наслідок забруднення батареї	±2 %
Вплив температури	±5 %

Загальні втрати потужності СЕС складають  $\pm 15\%$ .

Зважаючи на вище зазначені фактори, потрібно визначити її фактичну ефективність. Для цього потрібно розрахувати коефіцієнт ефективності ( $K_{\text{еф.}}$ ) СЕС. Ця величина дає можливість об'єктивно оцінити роботу станції з перетворення енергії Сонця на корисну для споживача енергію [49].

Коефіцієнт ефективності можна визначити як:

$$K_{\text{еф.}} = 1 - L = 1 - 0,15 = 0,85; \quad (3.3)$$

де 1 – коеф. ідеалізованої роботи станції; L – коеф. втрат.

Таким чином, для розрахунку фактичного рівня генерації необхідно провести наступну операцію:

$$E_{\text{реал.}} = E_{\text{р.пот}} \cdot K_{\text{еф.}} = 10420 \cdot 0,85 = 8857 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.4)$$

### 3.3 Розрахунок споживання електроенергії приватного будинку

Для того щоб оцінити ступінь покриття витрат електроенергії за допомогою сонячної генерації, необхідно розрахувати місячне та річне споживання електроенергії приватним будинком.

Для цього потрібно застосувати метод ручного зняття показників мережевого лічильника. В процесі щогодини фіксуються його показники, а в пікові години, коли навантаження на систему зростає (як правило це ранок та вечір) дослід фіксування можна проводити кожні 30 хвилин, щоб отримати більш точний результат. З часом показники лічильника зростають, а інтенсивність цього процесу прямо залежить від об'єму користування електроенергією.

На основі знятих показів, за формулою, проводиться розрахунок споживання електроенергії за конкретну годину:

$$E_{\text{г}} = A_{21} - A_1, \text{ кВт}\cdot\text{год}; \quad (3.5)$$

де  $A_{21}$  – показ лічильника на початку наступної години,  $A_1$  – показ лічильника на початку минулої години.

На основі цих даних був сформований графік денного споживання електроенергії (див. рис. 3.2). Що дає можливість зрозуміти коли рівень споживання високий, а в який час витарити значно меншають.

На рис. 3.2 видно, що у нічний час, з 1 до 6 години, споживання електроенергії на низькому рівні (менше 0,6 кВт). У цей період основне навантаження створюють прилади, що працюють постійно (холодильник, морозильна камера тощо), та періодично (бойлер і система автоматичної підкачки води). Починаючи з 6 ранку, і до 10 години – рівень споживання значно зростає, після чого поступово зменшується до настання нового піку, з 20 до 23 години.

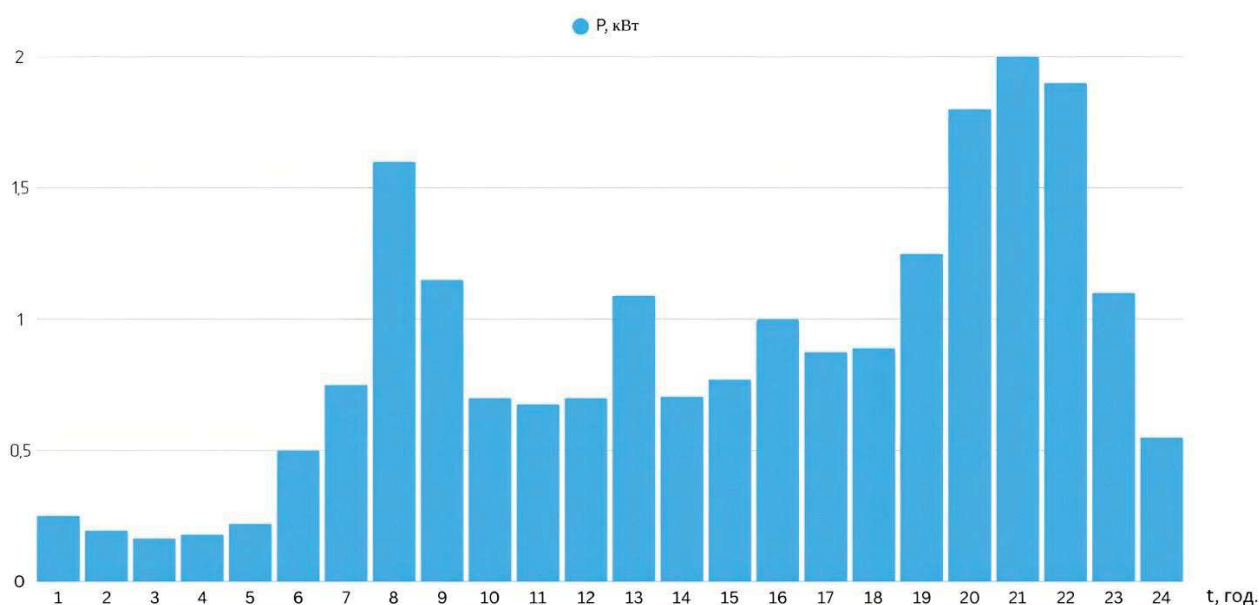


Рисунок 3.2 – Графік денного споживання електроенергії у будній день

Аналіз графіка, приведеного на рисунку 3.2 дає можливість обрахувати фактичне денне споживання в будній день, використовуючи наступну формулу:

$$E_{б.д.} = \sum_{i=1}^{24} \cdot E_{\Gamma i} = 21,53 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.6)$$

Частим явищем є деяка відмінність у енергоспоживанні в будні дні, та вихідні. Це обумовлено ритмом життя людей, і для точності розрахунків це також слід враховувати. Графік навантажень приведено на рисунку 3.3

Графік яскраво демонструє зміщення ранкового піку на 10 – 12 години, після чого денний спад має дещо плавнішу характеристику, при цьому видно, що кількість спожитої енергії у другій половині дня, більша ніж у будні. Проте так само помітно характерний вечірній пік, який також трохи зміщений у ніч.

Розрахунок загального денного споживання проведено за формулою 3.6. У результаті отримано значення  $E_{в.д.} = 24,9$  кВт · год.

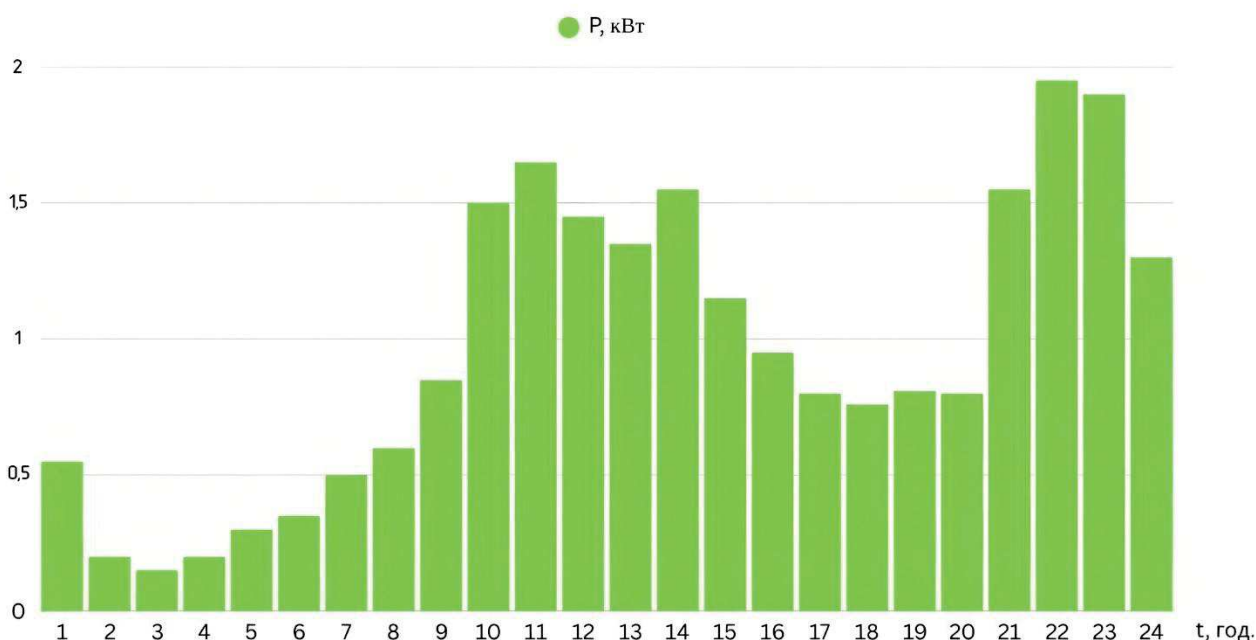


Рисунок 3.3 – Графік денного споживання електроенергії у вихідний день

Наступним кроком стане визначення місячного споживання, для чого слід визначити кількість будніх та вихідних днів протягом місяця. До прикладу можна взяти травень 2025 року, що має 31 день, з яких будні – 22 дні, та вихідні – 9. Загальне споживання за місяць у вихідні можна визначити за формулою:

$$E_{м.б} = E_{в.д} \cdot N_{д} = 20,01 \cdot 22 = 440,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}; \quad (3.7)$$

де  $N_{д}$  – кількість типових днів.

За тією ж формулою 3.7 проводимо операцію розрахунку загальної потужності для будних днів:

$$E_{м.б} = E_{б.д} \cdot N_{д} = 24,9 \cdot 9 = 224,1 \text{ кВт}\cdot\text{год}.$$

За травень 2025 року загальне споживання електроенергії:

$$E_{т} = E_{в.д} + E_{б.д} = 224,1 + 440,2 = 664,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}. \quad (3.8)$$

Результати розрахунків енергоспоживання приватного будинку за кожен місяць зведені у таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Розрахунок споживання електроенергії для кожного місяця

Місяць	Споживання у вихідні дні, кВт·год	Споживання у будні дні, кВт·год	Загальне місячне споживання, кВт·год
Січень	469,3	223	692,3
Лютий	430,1	199,5	629,6
Березень	471,5	219,2	690,7
Квітень	474,2	200,7	674,9
Травень	440,2	224,1	664,3
Червень	466,5	198,1	664,6
Липень	451,2	250,6	701,8
Серпень	495,3	198,5	693,8
Вересень	476	197,3	673,3
Жовтень	460,4	220,3	680,7

### Продовження таблиці 3.4

Листопад	466,2	201,5	667,7
Грудень	476,7	226	702,7

Використавши приведену формулу, розрахуємо загальнорічне споживання електроенергії:

$$E_{з,р} = \sum_{i=1}^{12} E_{M_i} = 8136,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}; \quad (3.9)$$

Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 05.06.2019 р. № 483, тарифна ставка за 1 кВт·год для побутових споживачів складає 4,32 гривні [50].

Відповідно можна визначити загальнорічну суму витрат коштів на електроенергію:

$$C_p = E_{з,р} \cdot 4,32 = 8136,4 \cdot 4,32 = 35149,3 \text{ грн.} \quad (3.10)$$

Розрахунок усіх вищезазначених параметрів потрібен для розуміння вхідних даних перед детальнішим аналізом роботи СЕС. Гібридна станція працює досить комплексно, тому для визначення ступеня рентабельності та ефективності, необхідно провести моделювання її роботи.

### 3.4 Моделювання роботи сонячної електростанції

За допомогою програмного забезпечення (ПЗ) System Advisor Model (SAM) було створено проєкт гібридної сонячної електростанції для моделювання її роботи за типових умов. Симуляція включає обрані раніше компоненти:

- монокристалічні фотомодулі - JA SOLAR JAM72S30-565LR;
- гібридний інвертор Huawei SUN2000-8K-LC0;
- АКБ Huawei LUNA2000-10-S0;

Решта компонентів - вимикачі, ОПН та двонаправлений лічильник, не впливають на роботу станції напряму. У даному випадку вони мають більш

периферійне значення, і забезпечують, відповідно захисну, та моніторингову функції.

Для моделювання SAM використовує метеорологічні бази даних, такі як NASA/Argonne National Laboratory, Typical Meteorological Year (TMY) Data, National Solar Radiation Database (NSRDB) та ін., для моделювання роботи станції. Програма створює симуляцію практично всіх процесів, що протікають між компонентами станції та зв'язаними з ними елементами. Це відбувається шляхом аналізу погоди, клімату, та умов середовища (затіннення, опади, інсоляція, температура, куту нахилу, орієнтація тощо). На основі цих даних, ПЗ створює модель роботи станції протягом середньостатистичного року. Відповідно, у результаті можна отримати детальну характеристику роботи станції.

Таким чином моделювання показало, загальнорічний рівень генерації 8 871 кВт·год., що наближено відповідає розрахованому значенню. Результати генерації приведено на рис. 3.4.

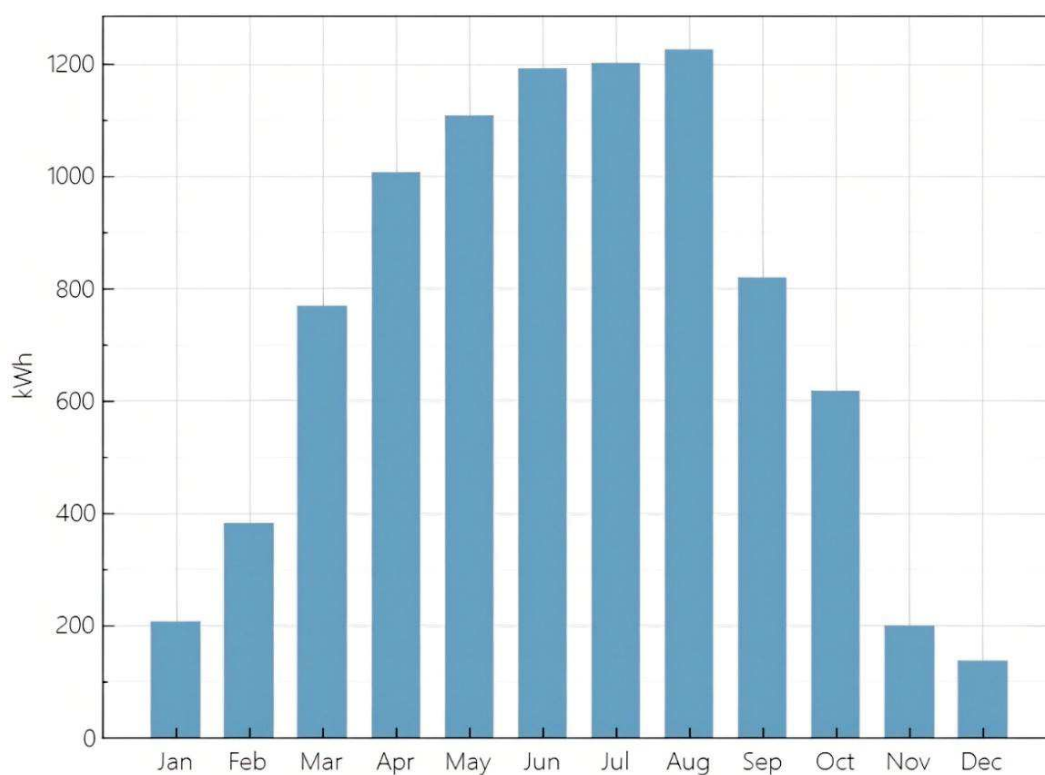


Рисунок 3.4 – Річний графік генерації сонячної електростанції

Результати симуляції (див рис. 3.4) демонструють яскраво виражену сезонну залежність, характерну для будь-яких сонячних станцій. Досить мала генерація в січні (близько 200 кВт·год), однак з кожним наступним місяцем ефективність станції помітно зростає, де в березні, станція вже здатна виробляти близько 800 кВт·год. Ситуація покращується з приходом теплої пори року. Починаючи з квітня, СЕС виходить на високий рівень продуктивності, досягаючи пікової генерації в серпні. Погодні умови, та висока інсоляція надають можливість панелям генерувати більше 1200 кВт·год за місяць. Проте вже через місяць ефективність установки падає приблизно на 30%, через те, що осіння пора характеризується нижчою середньою температурою, більшою кількістю опадів, та меншою інсоляцією. Це призводить до щомісячної деградації ефективності, і як наслідок, наприкінці року СЕС не може виробляти більше 140 кВт·год електроенергії.

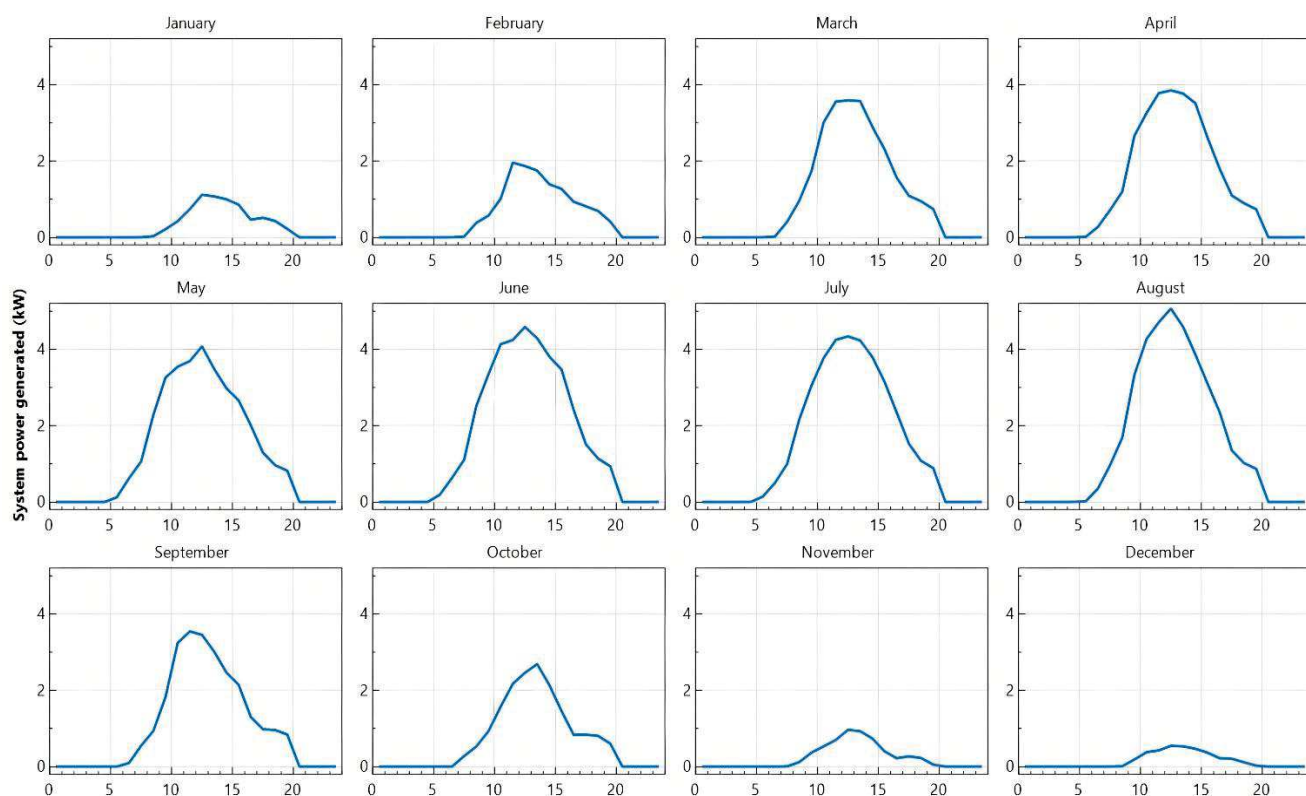


Рисунок 3.5 – Криві середньстатистичної генерації за кожен місяць

На рис. 3.5 зображено криві генерації електроенергії, проаналізовані шляхом

компіляції даних, враховуючи погодні умови, з наступним виведенням типового середньостатистичного дня для кожного місяця в році. Приведені графіки доповнюють рис. 3.4, демонструючи окрім сезонної залежності, ще й зміщення піків генерації, у відповідності до зміщення години сходу й заходу сонця, та тривалості світлового дня.

Беручи до уваги зібрану інформацію, характеристики обладнання та принцип їх взаємодії між собою, було сформовано профіль споживання та генерації електричної енергії за травень середньостатистичного року. На рис. 3.6 горизонтальна вісь відповідає за дні місяця, права вертикальна – ступінь заряду АКБ, ліва – потужність енергетичних потоків.

У денний час зростає сонячна інсоляція, при нижчому рівні споживання електроенергії – це дозволяє системі накопичити акумулятори, а надлишки віддати у мережу, адже сонячна генерація цілком забезпечує потреби споживачів.

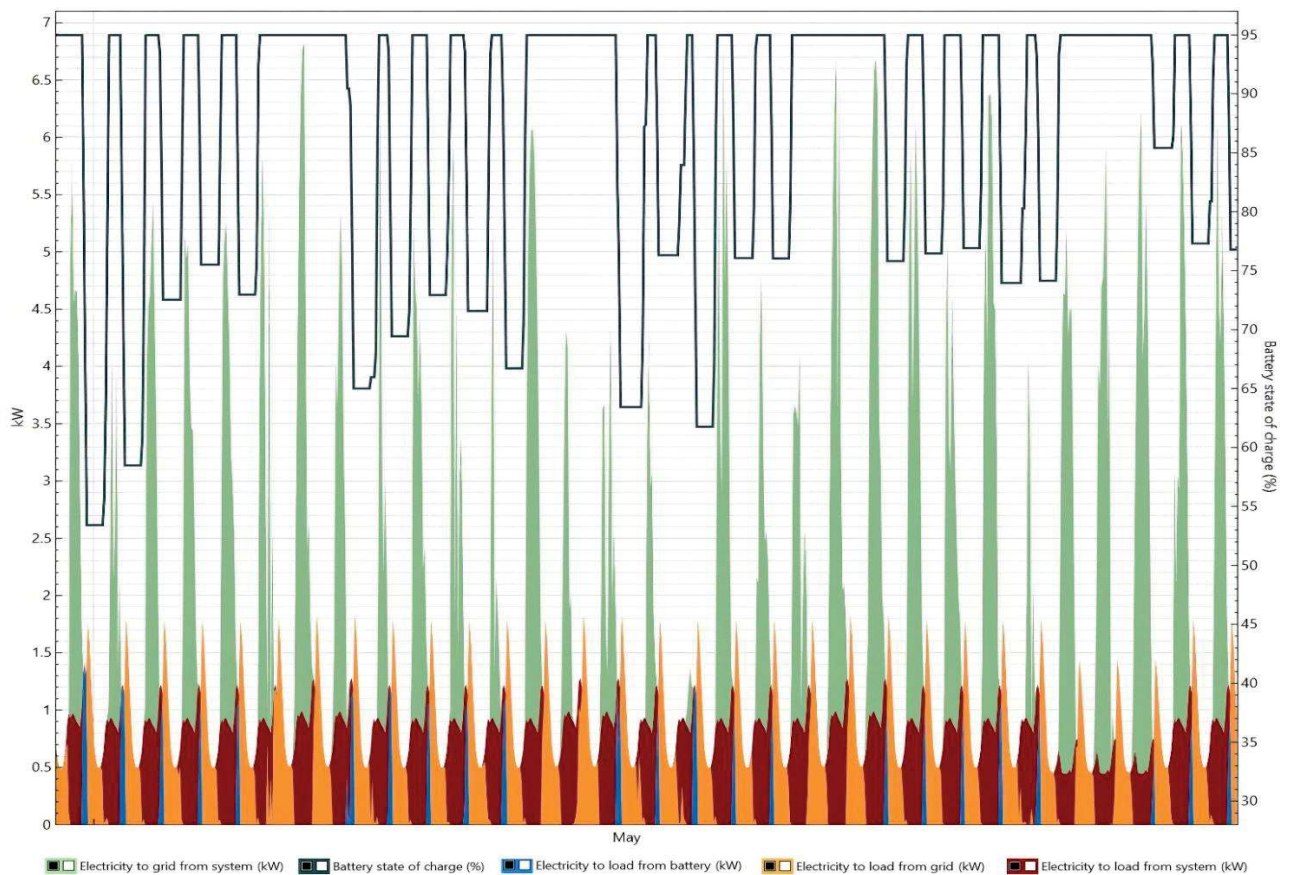


Рисунок 3.6 – Місячний профіль споживання та виробництва енергії

Одночасно з настанням вечірнього піку, падає і рівень виробництва електроенергії сонячними панелями. Це призводить до зросту живлення від мережі, однак деяку частину потреб все ж допомагає забезпечити АКБ, що позитивно впливає на матеріальну складову станції.

Як приклад, на рис. 3.7 зображено добовий профіль виробництва та споживання за 4 травня середньостатистичного року, де чітко видно, що у нічний час, будинок живиться від мережі, коли рівень споживання низький. Та зі сходом сонця, помітно зростає і профіцит згенерованої електроенергії.

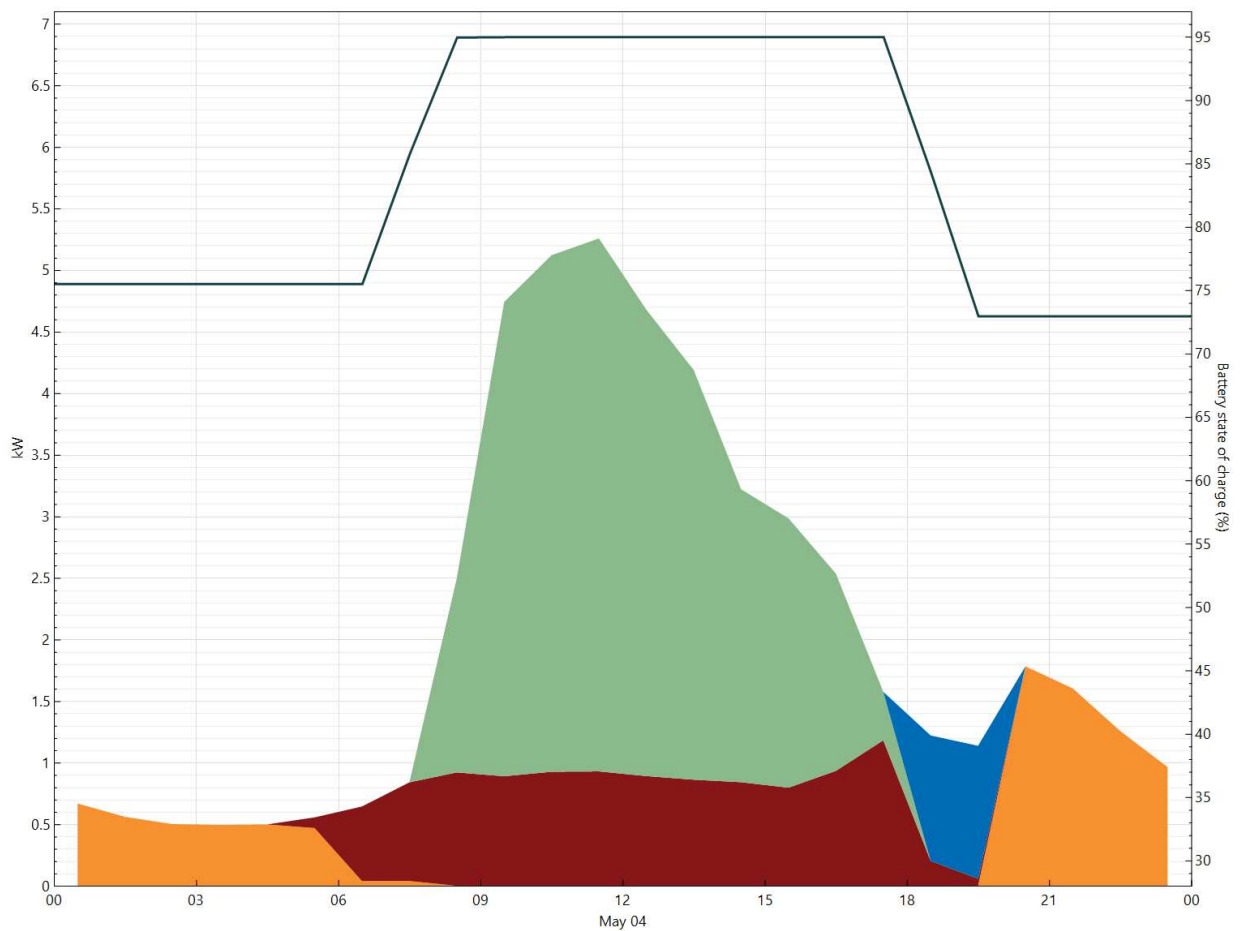


Рисунок 3.7 – Добовий профіль споживання та виробництва енергії

### 3.5 Розрахунок ефективності сонячної електростанції

Для того, щоб об'єктивно оцінити ефективність роботи станції, за допомогою

симуляції в SAM, необхідно визначити яку кількість електроенергії було віддано в мережу, спожито з неї, та яку частину навантаження покривали акумулятори (див табл 3.5).

Таблиця 3.5 – Річний звіт з відданої та спожитої електроенергії

Місяць	Енергія від системи до мережі, кВт·год	Енергія від мережі до системи, кВт·год	Енергія від АКБ, кВт·год
Січень	55,6	540	65,1
Лютий	150,3	396,2	92,6
Березень	451,8	372,6	95,6
Квітень	671,5	337,8	61,2
Травень	737,8	294,5	48,6
Червень	777,4	287,4	44,6
Липень	799,2	291,3	47,3
Серпень	825,9	293,9	60,7
Вересень	501	353,1	76,9
Жовтень	332,9	395	92,1
Листопад	78,8	546	37,3
Грудень	23,4	588,4	36
Сумарна к-ть	5405,6	4696,2	758

Розрахуємо прибуток за віддану електроенергію по «зеленому» тарифу. Згідно з Постановою НКРЕКП «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств», з 01.01.25 було встановлено вартість у розмірі 576,91 коп/кВт·год електроенергії для побутових СЕС, потужністю до 30 кВт [51].

За Податковим Кодексом України, загальний ПДВ (податок на додану вартість), встановлений на дохід від продажу електроенергії за цією системою тарифування складає 19,5% [52].

Відповідно, кінцевий дохід за річне надходження електроенергії від системи до мережі за «зеленим» тарифом становить:

$$D_{с.м} = \frac{E_{в\dot{и}д} \cdot V_{з.т}}{100} \cdot (1 - \text{ПДВ}); \quad (3.11)$$

$$D_{с.м} = \frac{5405,6 \cdot 576,91}{100} \cdot (1 - 0,195) = 25104,3 \text{ грн};$$

де  $E_{в\dot{и}д}$  – енергія, віддана у мережу;  $V_{з.т}$  – вартість за кВт·год за «зеленим» тарифом.

Різниця між споживанням електроенергії з мережі до встановлення гібридної СЕС, та після:

$$\Delta E = E_{з.р} - E_{м.с} = 8136,4 - 4696,2 = 3440,2 \text{ кВт·год}; \quad (3.12)$$

де  $E_{м.с}$  – кількість енергії, що надійшла з мережі до системи.

Користуючись формулою 3.10 можна розрахувати кількість заощадженої електроенергії в грошовому еквіваленті:

$$P_3 = \Delta E \cdot 4,32 = 3440,2 \cdot 4,32 = 14429,7 \text{ грн.}$$

У результаті запропонована модель гібридної СЕС забезпечує помітно високий рівень економії грошових ресурсів споживача, при цьому дозволяючи отримувати дохід від продажу електроенергії по «зеленому» тарифу.

Враховуючи споживання з мережі, можна визначити річний дохід за електроенергією:

$$D_p = P_3 + D_{с.м} - C_p; \quad (3.13)$$

$$D_p = 14429,7 + 25104,3 - 35149,3 = 4384,7 \text{ грн.}$$

Розрахунок показує, що зважаючи на усі вище зазначені фактори, сонячна станція надає можливість закрити грошові витрати на електроенергію за середньостатистичний рік, при цьому забезпечивши навіть невеликий дохід.

Результативність симуляції роботи СЕС та її розрахунок показали, що вона здатна практично повністю забезпечувати потребу споживачів у електроенергії в теплому пору року, в тому числі за рахунок відносно великої ємності АКБ.

### 3.6 Розрахунок автономної роботи сонячної електростанції

Визначимо протягом якого часу акумуляторна батарея здатна забезпечити приватний будинок електроенергією. Для цього візьмемо розраховані раніше дані про енергоспоживання об'єкта з врахуванням витрат на заряд АКБ та сонячної генерації.

Розрахунок буде проводитись для січня, коли рівень генерації значно нижчий, щоб проаналізувати здатність станції забезпечити автономну роботу в гірших умовах. Відповідно до графіка на рис. 3.4, за січень місяць фотомодулі виробили 207,5 кВт·год. Це означає, що за середньостатистичний день вони зможуть виробити:

$$E_{\text{вир.}} = \frac{E_{\text{в.січ.}}}{31} = \frac{207,5}{31} = 6,69 \text{ кВт}\cdot\text{год}; \quad (3.14)$$

де  $E_{\text{в.січ.}}$  - кількість енергії, виробленої за січень місяць.

Споживання електроенергії за один день в січні можна розрахувати за формулою 3.14:

$$E_{\text{з.с}} = \frac{E_{\text{с.січ.}}}{31} = \frac{692,3}{31} = 22,3 \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

де  $E_{\text{с.січ.}}$  - кількість енергії, спожитої за січень місяць.

Як було зазначено у попередньому розділі, корисна ємність АКБ Huawei LUNA2000-10-S0 становить 100% від номінальної, тому приймаємо її за 10 кВт·год.

ККД інвертора на перетворення струму, заявлений виробником - 98,1 %.

Знаючи це, можемо провести розрахунок кількості годин автономної роботи станції протягом доби, в умовах блекауту:

$$t_{\text{ав.}} = \frac{E_{\text{вир.}} + (E_{\text{АКБ}} \cdot \eta_i)}{E_{\text{з.с}}} \cdot 24 = \frac{6,69 + (10 \cdot 0,981)}{22,3} \cdot 24 = 17,7 \text{ год.} \quad (3.15)$$

### 3.7 Висновки до третього розділу

У третьому розділі цієї роботи було визначено потенціал генерації електричної енергії сонячною станцією, та враховано фактори, що мають безпосередній вплив на ефективність роботи установки. Визначено потреби споживача в електроенергії, та розраховано реальний рівень її генерації фотомодулями. Проведено моделювання роботи сонячних панелей у синергії з інвертором та акумуляторною батареєю, і на основі типових погодніх умов.

На основі зібраних даних, було проведено розрахунок загальної ефективності та рентабельності розробленої системи. Також було розраховано потенціал автономного енергозабезпечення приватного будинку за допомогою гібридної сонячної електростанції.

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було розроблено гібридну сонячну електростанцію для побутового використання.

Розглянуто способи віддачі надлишків виробленої електроенергії до централізованої мережі, види СЕС та принцип їх роботи. Проведено огляд основних компонентів системи та порівняння їх між собою.

Розроблено структурну блок-схему роботи сонячної станції, з наступним вибором основних компонентів:

- монокристалічної сонячної панелі JA SOLAR JAM72S30-565LR;
- гібридного інвертора Huawei SUN2000-8K-LC0;
- акумуляторної батареї Huawei LUNA2000-10-S0;
- двонаправленого лічильника GAMA 100 G1B.164.220.F3.B2.P4.C310.V1;
- обмежувач перенапруг OBO Bettermann V20-C 1+NPE-280.

У результаті: створено електричну схему з'єднання усіх компонентів СЕС

Після чого, було спроектовано розміщення фотоелектричних модулів на даху будівлі, та розроблено способи їх кріплення.

Проведено симуляцію роботи сонячної станції, на основі кліматичних даних, місця розташування, навколишніх умов, потреб споживача та особливостей роботи станції.

Було визначено реальний показник генерації електричної енергії, ступінь покриття потреб споживача та економічну доцільність віддачі надлишків виробленої енергії до мережі. Розраховано тривалість автономного забезпечення приватного будинку в умовах відключень живлення з мережі.

Розроблена гібридна сонячна електростанція показала себе з кращої сторони, забезпечивши високий рівень генерації енергії, при порівняно невеликій площі розміщення фотомодулів, високий рівень автономності, що в загальному дозволяє розглядати запропоновану СЕС не лише як спосіб економії витрат на електроенергію, а й у якості повноцінного резервного живлення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Global Solar Council announces 2 terawatt milestone achieved for solar [Електронний ресурс] // Global Solar Council. – Режим доступу: <https://www.globalsolarcouncil.org/news/global-solar-council-announces-2-terawatt-milestone-achieved-for-solar/> (дата звернення: 04.05.2025).
2. Домогосподарства наростили потужність приватних СЕС у 2022 році на 78% [Електронний ресурс] // Держенергоефективності України. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/domohospodarstva-narostyly-potuzhnist-pryv-atnykh-ses-u-2022-rotsi-na-78> (дата звернення: 04.05.2025).
3. Енергоефективність та партнерство [Електронний ресурс] // Avenston. – Режим доступу: <https://avenston.com/articles/energy-efficiency-partnership/> (дата звернення: 07.05.2025).
4. Мережеві сонячні електростанції [Електронний ресурс] // Avenston. – Режим доступу: <https://avenston.com/sectors/solar/commercial/types/on-grid/> (дата звернення: 06.05.2025).
5. Сонячні електростанції: практичний довідник [Електронний ресурс] // Енергетичні рішення. – Режим доступу: <https://energystorage.com.ua/spravochnik-solnechnye-elektrostantsii-ses/> (дата звернення: 07.05.2025).
6. Діяльність активного споживача на роздрібному ринку електричної енергії [Електронний ресурс] // Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). – Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/diyalnist-aktivnogo-spozhivacha-na-rozdribnomu-rinku-elektrichnoyi-energiyi-1/> (дата звернення: 07.05.2025).
7. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 06.05.2025).
8. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-

VIII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://protocol.ua/ua/pro\\_rinok\\_elektrichnoi\\_energii\\_vid\\_13\\_04\\_2017\\_2019\\_viii\\_statt\\_ua\\_58\\_1](https://protocol.ua/ua/pro_rinok_elektrichnoi_energii_vid_13_04_2017_2019_viii_statt_ua_58_1) (дата звернення: 07.05.2025).

9. Системи Net Metering та Net Billing: в чому їх особливості? [Електронний ресурс] // Атмосфера. – Режим доступу: <https://www.atmosfera.ua/media/sistemi-net-metering-ta-net-billing-v-chomu-yih-osobli-vosti-atmosfera> (дата звернення: 06.05.2025).

10. Що таке Net Billing та як почати за ним реалізовувати електроенергію [Електронний ресурс] // Isolar. – Режим доступу: <https://isolar.com.ua/ua/2024/10/21/shho-take-net-billing-ta-yak-pochaty-za-nym-realizovuvaty-elektroenergiyu/> (дата звернення: 07.05.2025).

11. Відновлювані джерела енергії : монографія / А. А. Барило [та ін.] ; за заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. – 492 с.

12. Автономна сонячна електростанція: основні типи, компоненти та переваги [Електронний ресурс] // Könnner & Söhnen. – Режим доступу: <https://koenner-soehnen.com/en/articles-list/standalone-solar-power-system> (дата звернення: 12.05.2025).

13. Сонячний генератор Jackery 1000 [Електронний ресурс] // Alfa.Solar. – Режим доступу: <https://alfa.solar/uk/sonyachnij-generator-jackery-1000-explorer-1000-1solarsaga-100w-id1329.html> (дата звернення: 20.05.2025).

14. BLUETTI AC200P 2000Wh/2000W Portable Power Station [Електронний ресурс] // BLUETTI. – Режим доступу: <https://www.bluettipower.ca/products/bluetti-ac200p-2000wh-2000w> (дата звернення: 10.05.2025).

15. Стаднік М. І. Гібридне електропостачання : навч. посібник / М. І. Стаднік, Д. П. Проценко. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 204 с.

16. Барановський В. А. Ефективність використання гібридних фотоелектричних систем у побутовому секторі // Технічні науки та технології. –

2021. – № 3(25). – С. 45–52.

17. Яковлєв Є. О. Основи автономного та гібридного енергопостачання : навч. посіб. / Є. О. Яковлєв, В. В. Кухарчук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 148 с.

18. Андрієнко Ю. С. Сонячна енергетика: основи проектування та експлуатації фотоелектричних систем : навч. посіб. / Ю. С. Андрієнко, І. І. Смоляр. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 140 с.

19. Будова і принцип роботи сонячної батареї [Електронний ресурс] // Правильне електроживлення. – Режим доступу: <https://prel.prom.ua/a315870-sonyachna-batareya-budova.html> (дата звернення: 11.05.2025).

20. Ефективність сонячних панелей – ККД та як підвищити продуктивність [Електронний ресурс] // SIG Energy. – Режим доступу: <https://www.sig.energy/efektyvnist-sonyachnyh-panelej-kkd-ta-yak-pidvyshhyty-produktyvnist/> (дата звернення: 11.05.2025).

21. Монокристалічна сонячна панель Longi Solar LR5-54НТН-435М [Електронний ресурс] // Solar Energy. – Режим доступу: <https://solar-energy.com.ua/solnechnye-batarei/solnechnaya-panel-longi-solar-lr5-54hth-430m.html> (дата звернення: 12.05.2025).

22. Сонячна панель Volt Polska MONO FLEX 200W 18V [Електронний ресурс] // E-Katalog. – Режим доступу: <https://ek.ua/ua/VOLT-POLSKA-MONO-FLEX-200W-18V.htm> (дата звернення: 13.05.2025).

23. International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV): 15th Edition, 2024 [Електронний ресурс] / VDMA. – Frankfurt am Main, 2024. – 82 с. – Режим доступу: <https://www.qualenergia.it/wp-content/uploads/2024/06/ITRPV-15th-Edition-2024-2.pdf> (дата звернення: 29.05.2025).

24. Двосторонні (bifacial) сонячні панелі [Електронний ресурс] // Altesco. – Режим доступу: <https://altesco.in.ua/ua/tekhnolohiyi/soniachna-enerhetyka/dvostoronni-bifacial-soniachni-paneli> (дата звернення: 29.05.2025).

25. Призначення, особливості та різновиди інверторів напруги [Електрон-

ний ресурс] // Tcom Group. – Режим доступу: <https://tcom-group.com/ua/poleznaaya-informaciya/prednaznachenie-osobennosti-i-raznovidnosti-invertorov> (дата звернення: 13.05.2025).

26. Петренко В. О. Основи сонячної енергетики : навч. посібник. – Одеса : ОНПУ, 2022. – 112 с.

27. Титко Р. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України) : навч. посіб. / Р. Титко, В. М. Калініченко. – Варшава : OWG, 2010. – 530 с.

28. Мікроінвертор EcoFlow PowerStream 800W [Електронний ресурс] // NewTime. – Режим доступу: <https://newtime.ua/komplekty-enerhonezalezhnosti/mikroinvertor-ecoflow-powerstream-800w-efpowerstreammi-eu-800w> (дата звернення: 15.05.2025).

29. Типи акумуляторних батарей: повний огляд [Електронний ресурс] // DEPS. – Режим доступу: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/10591.html> (дата звернення: 15.05.2025).

30. Акумуляторна батарея 10.24 кВт·год LiFePO4 48V 200Ah [Електронний ресурс] // LRIKER. – Режим доступу: <https://lriker.ua/store/akumulyatorni-batarei/akumulyatorna-batareya-1024-kvtgod-lifepo4-48v-200ah> (дата звернення: 15.05.2025).

31. Raspberry Pi - PWM і Сервопривод [Електронний ресурс] // AVIS Lab. – Режим доступу: <https://blog.avislab.com/raspberry-pi-pwm/> (дата звернення: 15.05.2025).

32. Контролер заряду Juta SY48100A MPPT для сонячних панелей [Електронний ресурс] // Електротехніка. – Режим доступу: <https://elptr.com/ua/kontroller-zarjada-solnechnoj-batarei-juta-100a-48v-mppt> (дата звернення: 15.05.2025).

33. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / A. Luque, S. Hegedus. – 2nd ed. – Chichester : Wiley, 2011. – 1168 с.

34. Додаток Huawei FusionSolar [Електронний ресурс] // SIG Energy. – Режим доступу: <https://www.sig.energy/product/mobilnyj-dodatok-fusionsolar-app/>

(дата звернення: 17.05.2025).

35. Сонячна панель JA SOLAR JAM72S30-565LR [Електронний ресурс] // ENF Solar. – Режим доступу: <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystal-line/66266> (дата звернення: 17.05.2025).

36. Гібридний інвертор Huawei SUN2000-8K-LC0 [Електронний ресурс] // iSolar. – Режим доступу: [https://isolar.km.ua/ua/p2543765006-gibridnyj-invertor-odnofaznyj.html?source=merchant\\_center&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=PMax\\_Inverters&utm\\_content=\\_&utm\\_term=&utm\\_position=&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=22262993676&gclid=CjwKCAjw56DBBhAkEiwAaFsG-n-Rm2VW9nDMvBbK58eKu\\_7gL0irjb99MtzyPxsmEa-9oCorde\\_sKhoCigoQAvD\\_BwE](https://isolar.km.ua/ua/p2543765006-gibridnyj-invertor-odnofaznyj.html?source=merchant_center&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=PMax_Inverters&utm_content=_&utm_term=&utm_position=&gad_source=1&gad_campaignid=22262993676&gclid=CjwKCAjw56DBBhAkEiwAaFsG-n-Rm2VW9nDMvBbK58eKu_7gL0irjb99MtzyPxsmEa-9oCorde_sKhoCigoQAvD_BwE) (дата звернення: 17.05.2025).

37. SUN2000-(8K, 10K)-LC0 Series User Manual [Електронний ресурс] // Huawei. – Режим доступу: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100325442/426cffd9/about-this-document> (дата звернення: 19.05.2025).

38. Smart Energy Controller. SUN2000-8/10K-LC0 [Електронний ресурс] // Huawei Solar. – Режим доступу: <https://solar.huawei.com/en/products/sun2000-8-10k-lc0/specs/> (дата звернення: 17.05.2025).

39. Smart String Energy Storage System. LUNA2000-5/10/15-S0 [Електронний ресурс] // Huawei Solar. – Режим доступу: <https://solar.huawei.com/en/products/LUNA2000-5-10-15-S0/specs/> (дата звернення: 17.05.2025).

40. HV vs. LV Solar Batteries: Choosing the Right Energy Storage Solution [Електронний ресурс] // Deye ESS. – Режим доступу: <https://deyeess.com/high-voltage-vs-low-voltage-solar-battery/> (дата звернення: 17.05.2025).

41. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії : постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від 14.03.2018 № 312 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18> (дата звернення: 18.08.2025).

42. Лічильник електроенергії GAMA 100 G1B.164.220.F3.B2.P4.C310.V1 [Електронний ресурс] // Elgama. – Режим доступу: <https://www.elgama.com.ua/odnofaznyj-gama-100/type-gama-100-b/> (дата звернення: 18.05.2025).

43. Європейська напруга і нові стандарти: що зміниться у Кодексі систем розподілу [Електронний ресурс] // Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). – Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-zatverdzhennya-zmin-do-kodeksu-sistem-rozpodilu-10> (дата звернення: 18.05.2025).

44. Коваль С. І. Захист електричних мереж від перенапруг : навч. посіб. / С. І. Коваль, В. В. Громов. – Київ : НУБіП України, 2020. – 124 с.

45. Обмежувач перенапруги (розрядник) тип II, V20-C 1+NPE-280 Обо Bettermann [Електронний ресурс] // Shop220. – Режим доступу: <https://shop220.com.ua/products/ogranichitel-perenapryazheniya-razryadnik-tip-ii-v20-c-1-npe-280-obo-bettermann-5094650> (дата звернення: 18.05.2025).

46. ДСТУ EN 60898-1:2014 Устаткування електричне допоміжне. Автоматичні вимикачі для захисту від надструмів побутового та аналогічного призначення. Частина 1. Вимикачі змінного струму [Чинний від 2014-06-01]. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. – 26 с. – (Національний стандарт України). – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=83046](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83046) (дата звернення: 17.05.2025).

47. European Commission, Joint Research Centre. Photovoltaic Geographical Information System [Електронний ресурс] : online database / Joint Research Centre. – Режим доступу: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) (дата звернення: 24.05.2025).

48. Markvart T. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications / T. Markvart, L. Castaner ; ed. by A. McEvoy. – 2nd ed. – Oxford : Academic Press ; Kidlington : Elsevier, 2012. – 1268 p.

49. Клименко М. Ф., Бондаренко І. П. Відновлювана енергетика та енерго-

ефективні технології. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Київ 2020. 824 с.

50. Про затвердження Положення про покладення спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії : постанова Кабінету Міністрів України від 05.06.2019 № 483 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2019-п#n6> (дата звернення: 25.05.2025).

51. Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств : постанова НКРЕКП від 30.12.2024 № 2422 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-zelenih-tarifiv-na-elektrichnu-energiyu-viroblenu-generuyuchimi-ustanovkami-privatnih-domogospodarstv-11> (дата звернення: 26.05.2025).

52. Податковий кодекс України : Закон України від 02.12.2010 № 2755-VI // Відомості Верховної Ради України. – 2011. – № 13–14, № 15–16, № 17. – Ст. 112 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17> (дата звернення: 26.05.2025).